

Zum Mond in einer Sekunde

Mit Licht Distanzen zu Satelliten messen

Daniel Arnold

Astronomie am Mittag

BEA

29. April 2019



Schnell, schneller, ...

- Licht bewegt sich nicht unendlich schnell, sondern hat eine endliche Geschwindigkeit, die **Lichtgeschwindigkeit**.



Schnell, schneller, ...

- Licht bewegt sich nicht unendlich schnell, sondern hat eine endliche Geschwindigkeit, die **Lichtgeschwindigkeit**.
- Licht fliegt furchtbar schnell, nichts fliegt schneller als Licht!

Daniel Arnold: Zum Mond in einer Sekunde – Mit Licht Distanzen zu Satelliten messen
Astronomie am Mittag, 29. April 2019

Schnell, schneller, ...

- Licht bewegt sich nicht unendlich schnell, sondern hat eine endliche Geschwindigkeit, die **Lichtgeschwindigkeit**.
- Licht fliegt furchtbar schnell, nichts fliegt schneller als Licht!

Lat. *celeritas*: "Geschwindigkeit"

$$c = 299'792'458 \text{ m/s}$$

Schnell, schneller, ...

- Licht bewegt sich nicht unendlich schnell, sondern hat eine endliche Geschwindigkeit, die **Lichtgeschwindigkeit**.
- Licht fliegt furchtbar schnell, nichts fliegt schneller als Licht!

Lat. *celeritas*: "Geschwindigkeit"

$$c = 299'792'458 \text{ m/s}$$

$$c = 1'079'252'848.8 \text{ km/h}$$

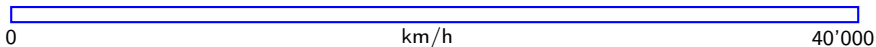
Übersicht


$$c = 1'079'252'848.8 \text{ km/h}$$

1. Digestif
2. Woher weiss man das?
3. Mit Licht Distanzen messen

Digestif

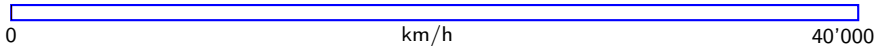
Wie *schnell* fliegt Licht?



Digestif

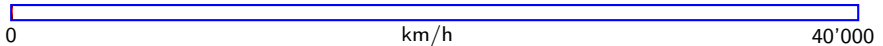
Wie *schnell* fliegt Licht?

- Mensch, gehend: 5 km/h



Wie *schnell* fliegt Licht?

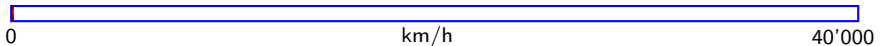
- Mensch, gehend: 5 km/h
- Usain Bolt: 45 km/h



Digestif

Wie *schnell* fliegt Licht?

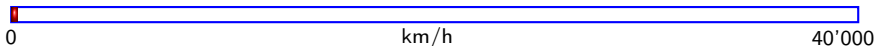
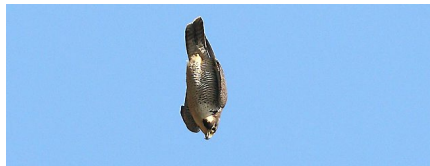
- Mensch, gehend: 5 km/h
- Usain Bolt: 45 km/h
- Gepard: 120 km/h



Digestif

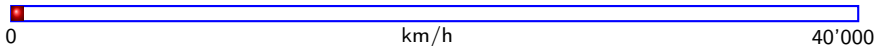
Wie *schnell* fliegt Licht?

- Mensch, gehend: 5 km/h
- Usain Bolt: 45 km/h
- Gepard: 120 km/h
- Wanderfalke im Sturzflug: 320 km/h



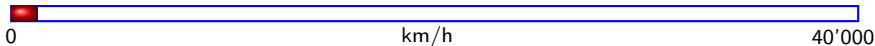
Wie *schnell* fliegt Licht?

- Mensch, gehend: 5 km/h
- Usain Bolt: 45 km/h
- Gepard: 120 km/h
- Wanderfalke im Sturzflug: 320 km/h
- Shinkansen: 603 km/h



Wie *schnell* fliegt Licht?

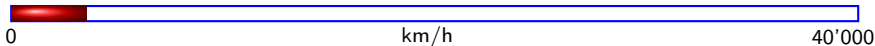
- Mensch, gehend: 5 km/h
- Usain Bolt: 45 km/h
- Gepard: 120 km/h
- Wanderfalke im Sturzflug: 320 km/h
- Shinkansen: 603 km/h
- Schallgeschwindigkeit (Luft, 20°C): 1'236 km/h





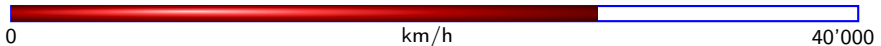
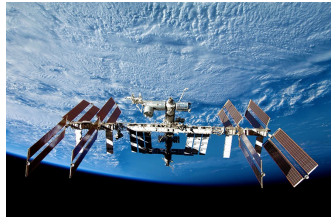
Wie *schnell* fliegt Licht?

- Mensch, gehend: 5 km/h
- Usain Bolt: 45 km/h
- Gepard: 120 km/h
- Wanderfalke im Sturzflug: 320 km/h
- Shinkansen: 603 km/h
- Schallgeschwindigkeit (Luft, 20°C): 1'236 km/h
- Schnellstes Flugzeug: 3'529 km/h



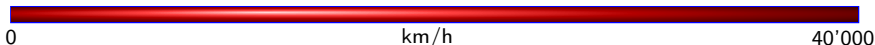
Wie *schnell* fliegt Licht?

- Mensch, gehend: 5 km/h
- Usain Bolt: 45 km/h
- Gepard: 120 km/h
- Wanderfalke im Sturzflug: 320 km/h
- Shinkansen: 603 km/h
- Schallgeschwindigkeit (Luft, 20°C): 1'236 km/h
- Schnellstes Flugzeug: 3'529 km/h
- Internationale Raumstation: 27'600 km/h

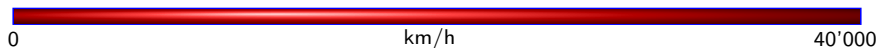


Wie *schnell* fliegt Licht?

- Mensch, gehend: 5 km/h
- Usain Bolt: 45 km/h
- Gepard: 120 km/h
- Wanderfalke im Sturzflug: 320 km/h
- Shinkansen: 603 km/h
- Schallgeschwindigkeit (Luft, 20°C): 1'236 km/h
- Schnellstes Flugzeug: 3'529 km/h
- Internationale Raumstation: 27'600 km/h
- Schnellste Menschen (Apollo 10): 39'897 km/h

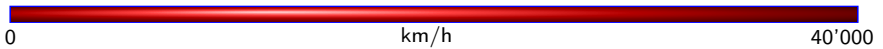


Digestif



Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?

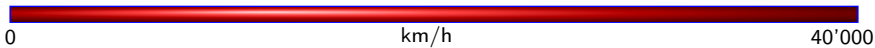
Digestif



Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



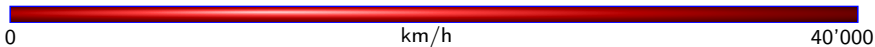
Digestif



Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



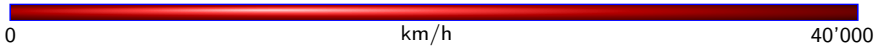
Digestif



Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



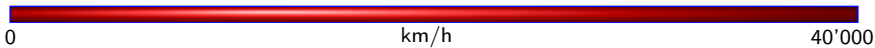
Digestif



Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



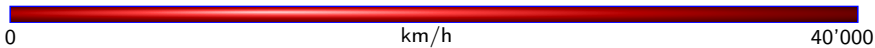
Digestif



Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



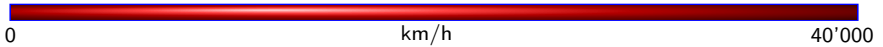
Digestif



Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



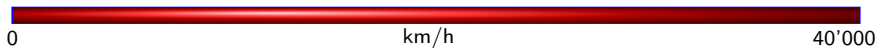
Digestif



Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



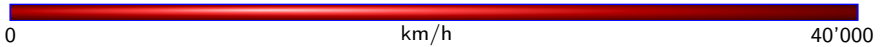
Digestif



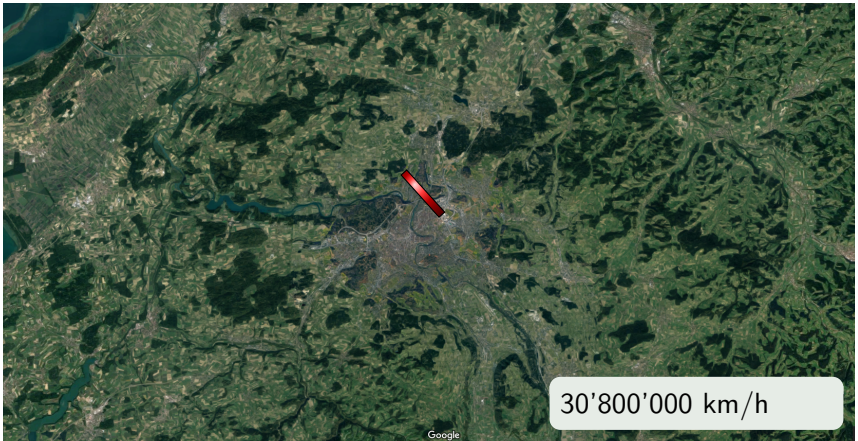
Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



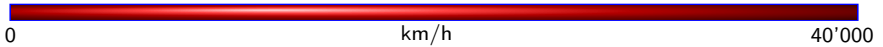
Digestif



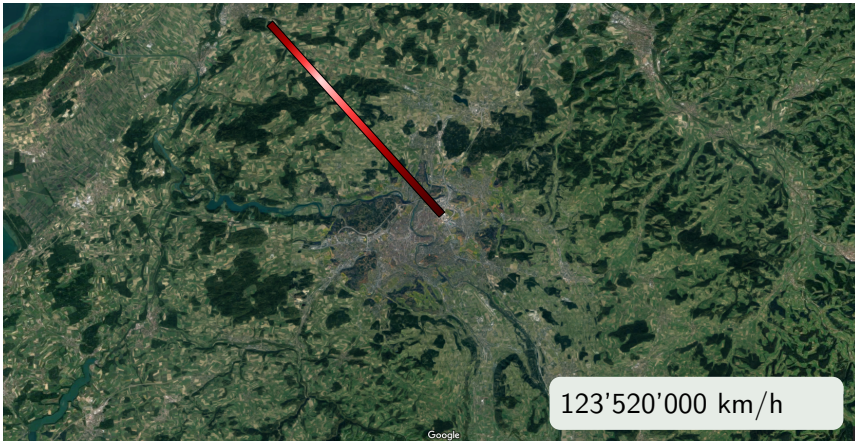
Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



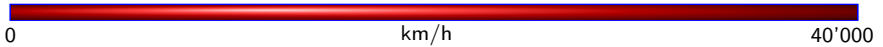
Digestif



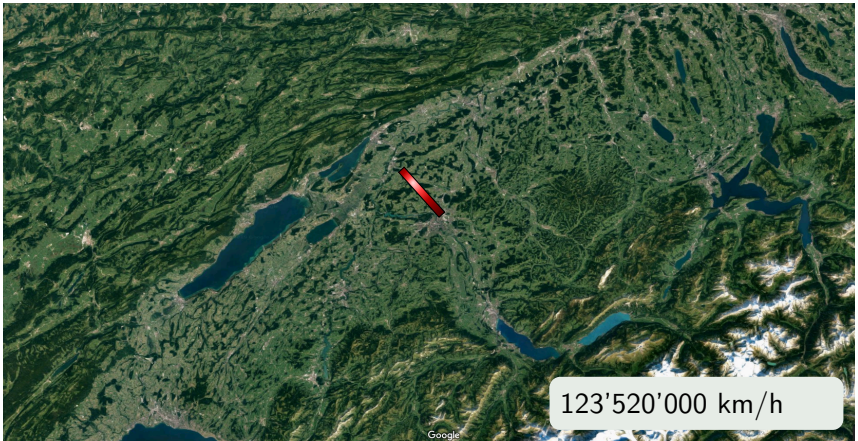
Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



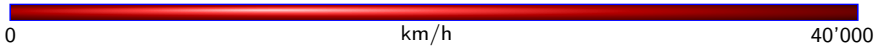
Digestif



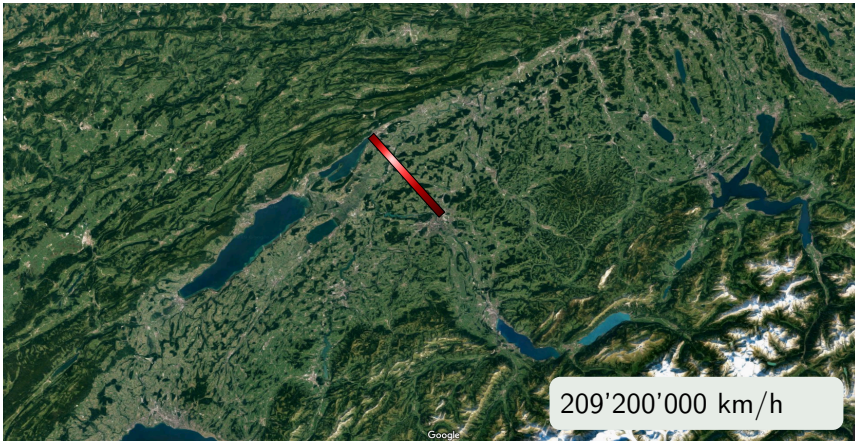
Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



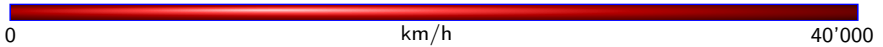
Digestif



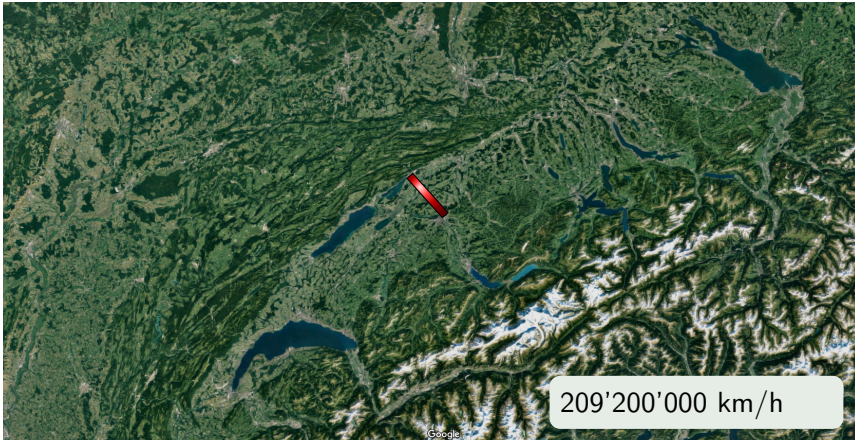
Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



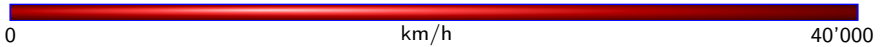
Digestif



Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



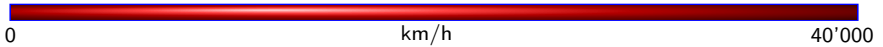
Digestif



Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



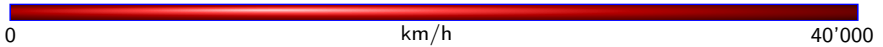
Digestif



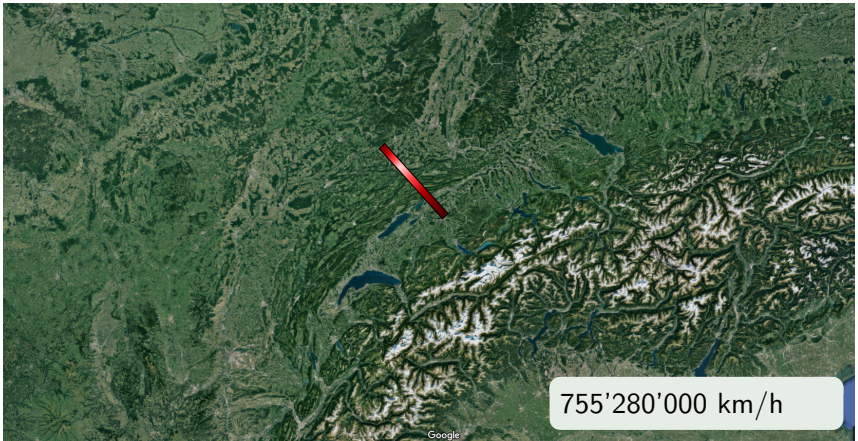
Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



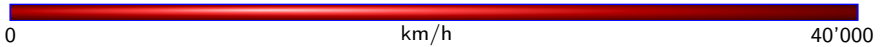
Digestif



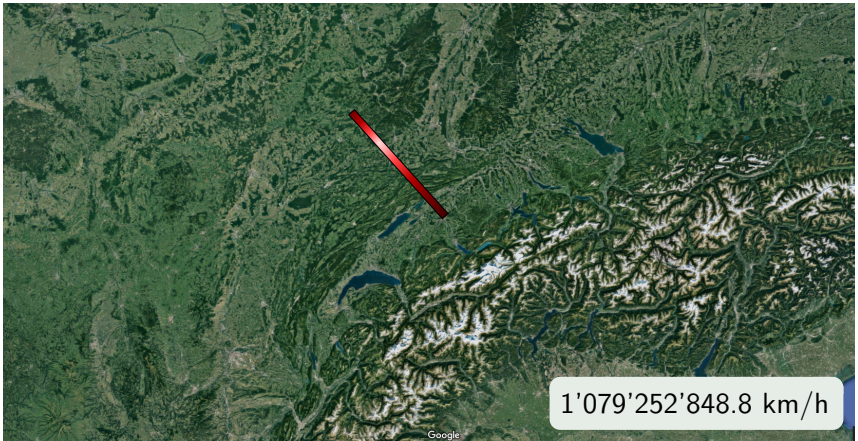
Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



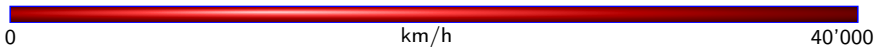
Digestif



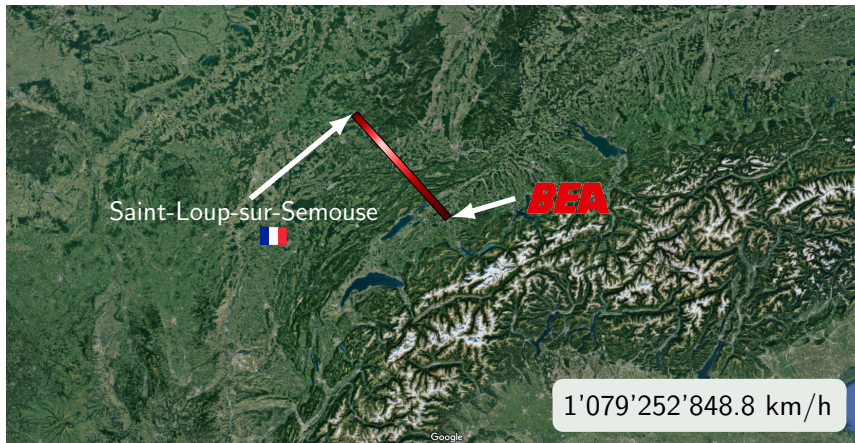
Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



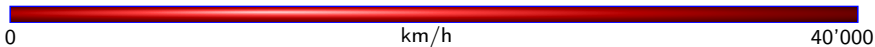
Digestif



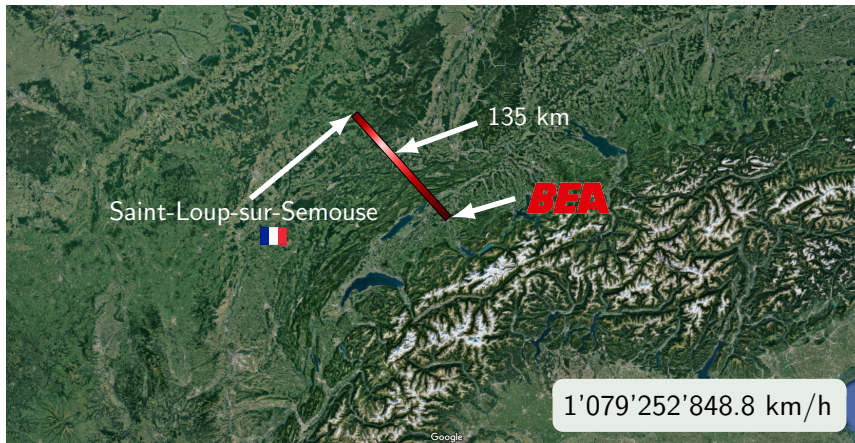
Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



Digestif



Dieser Massstab ist 5 m lang. Wie lang muss er sein, damit wir die Lichtgeschwindigkeit auftragen können?



Digestif

Der Mond ist von der Erde im Mittel etwa 385'000 km entfernt. Um zum Mond zu gelangen braucht

Daniel Arnold: Zum Mond in einer Sekunde – Mit Licht Distanzen zu Satelliten messen
Astronomie am Mittag, 29. April 2019

Digestif

Der Mond ist von der Erde im Mittel etwa 385'000 km entfernt. Um zum Mond zu gelangen braucht

- ein Mensch, gehend: 8.8 Jahre

Digestif

Der Mond ist von der Erde im Mittel etwa 385'000 km entfernt. Um zum Mond zu gelangen braucht

- ein Mensch, gehend: 8.8 Jahre
- Usain Bolt: 1 Jahr

Digestif

Der Mond ist von der Erde im Mittel etwa 385'000 km entfernt. Um zum Mond zu gelangen braucht

- ein Mensch, gehend: 8.8 Jahre
- Usain Bolt: 1 Jahr
- der Shinkansen: 26.6 Tage

Digestif

Der Mond ist von der Erde im Mittel etwa 385'000 km entfernt. Um zum Mond zu gelangen braucht

- ein Mensch, gehend: 8.8 Jahre
- Usain Bolt: 1 Jahr
- der Shinkansen: 26.6 Tage
- das schnellste Flugzeug: 4.5 Tage

Digestif

Der Mond ist von der Erde im Mittel etwa 385'000 km entfernt. Um zum Mond zu gelangen braucht

- ein Mensch, gehend: 8.8 Jahre
- Usain Bolt: 1 Jahr
- der Shinkansen: 26.6 Tage
- das schnellste Flugzeug: 4.5 Tage
- ...
- ein Lichtblitz: 1.3 Sekunden

Digestif

Der Mond ist von der Erde im Mittel etwa 385'000 km entfernt. Um zum Mond zu gelangen braucht

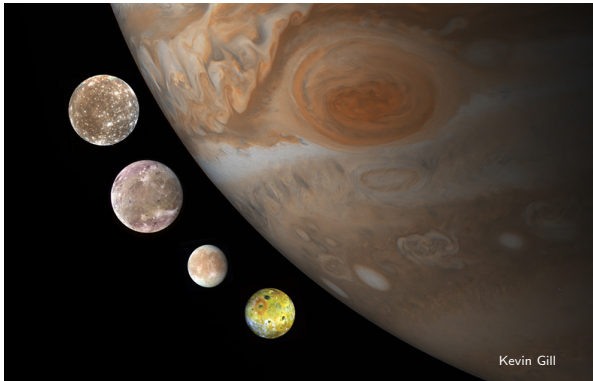
- ein Mensch, gehend: 8.8 Jahre
- Usain Bolt: 1 Jahr
- der Shinkansen: 26.6 Tage
- das schnellste Flugzeug: 4.5 Tage
- ...
- ein Lichtblitz: 1.3 Sekunden

Zum Mond in einer Sekunde...

Woher weiss man das?

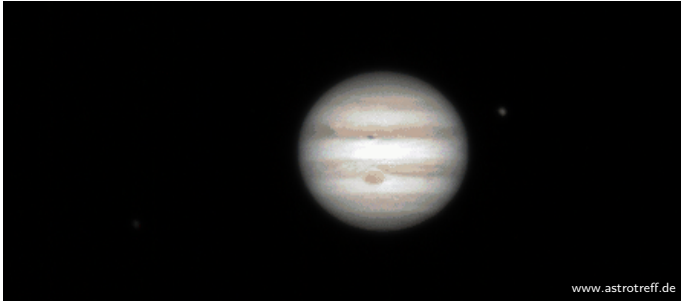
Woher weiss man das?

Jupiter und seine vier grössten Monde: Kallisto, Ganymed, Europa, Io



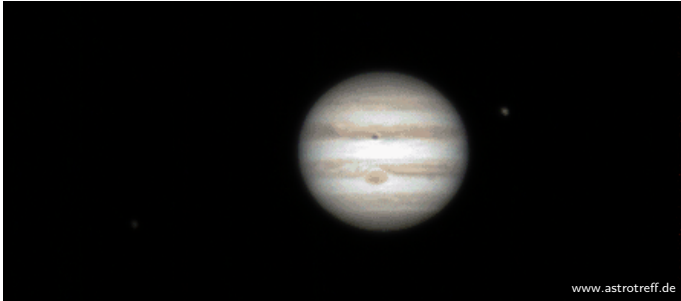
- Galileo Galilei entdeckte die vier Monde 1610.
- Ihre Bewegung diente im 17. Jh. in der Seefahrt als Uhr.

Woher weiss man das?



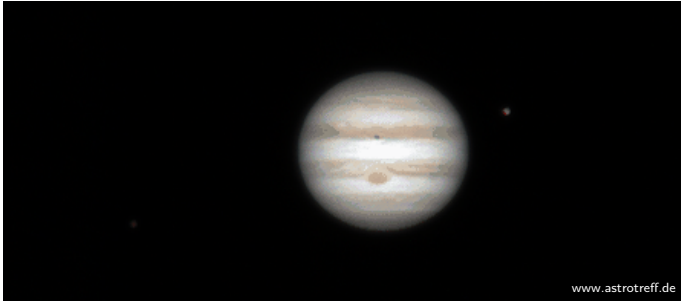
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



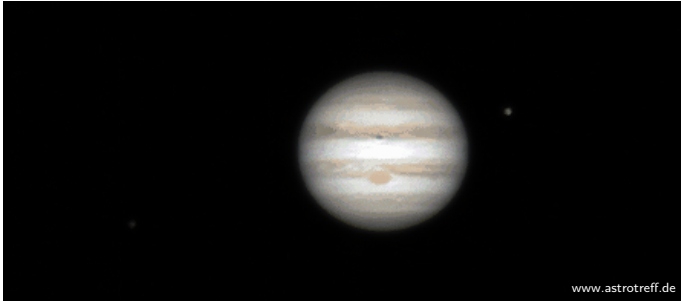
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit **auf See die Zeit bestimmen.**

Woher weiss man das?



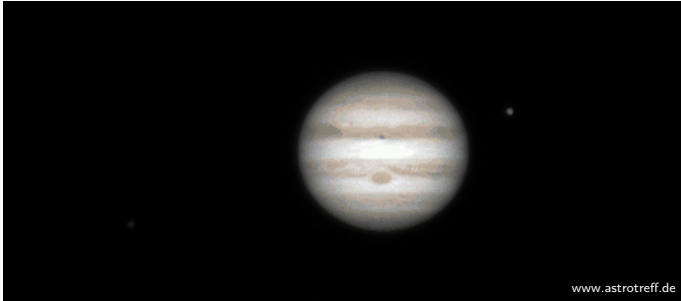
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



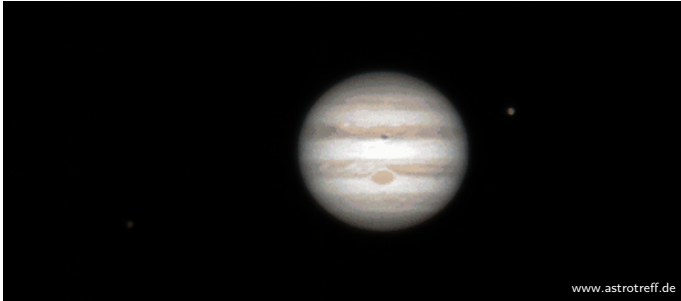
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



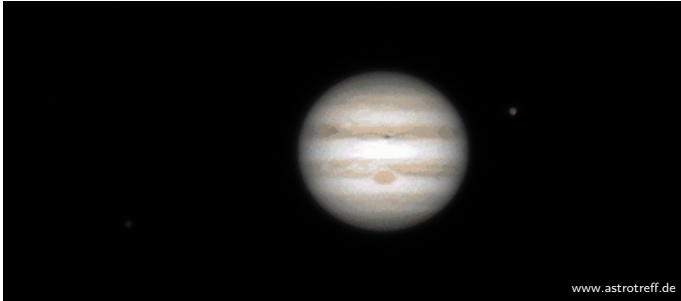
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



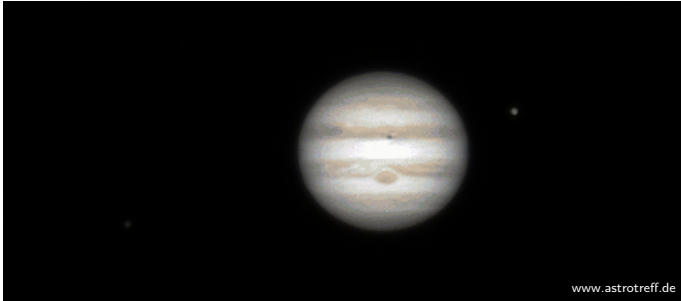
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



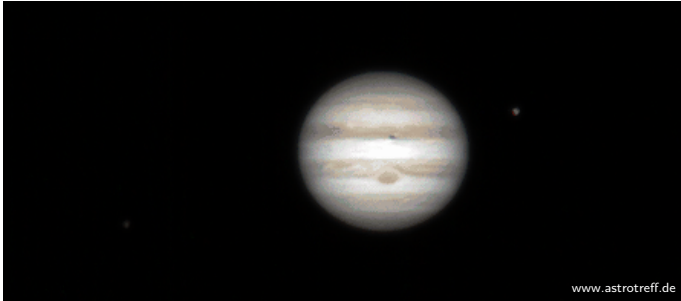
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



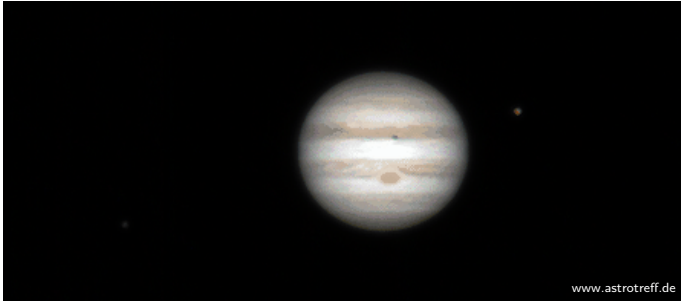
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



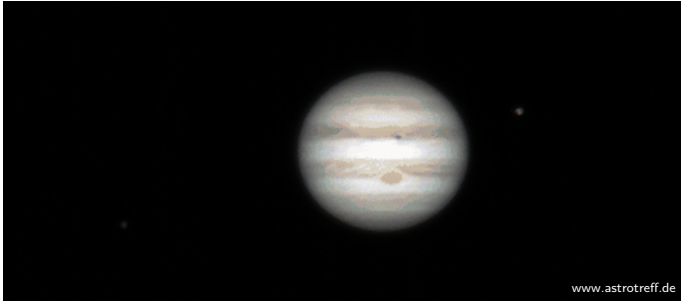
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



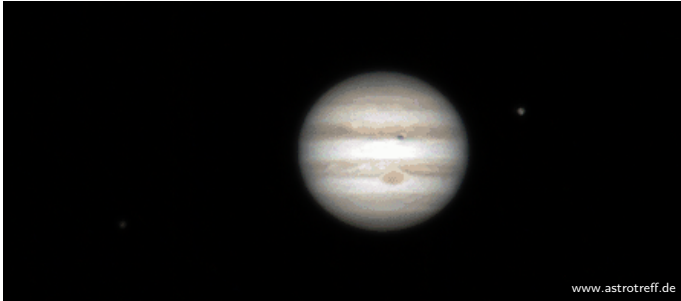
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit **auf See die Zeit bestimmen.**

Woher weiss man das?



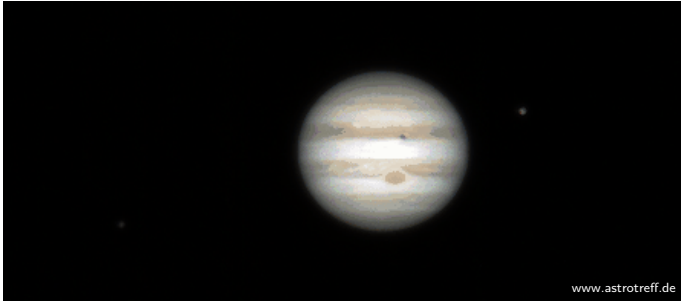
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



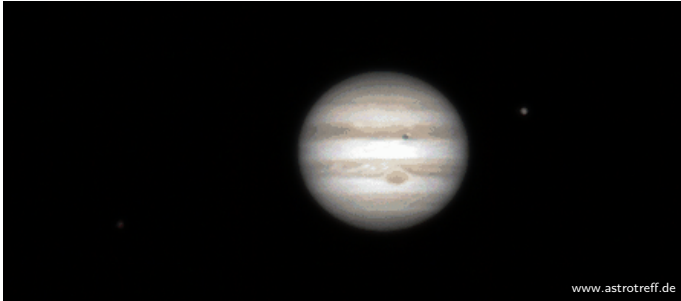
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



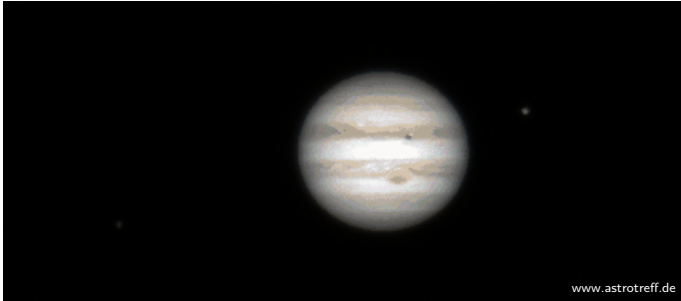
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



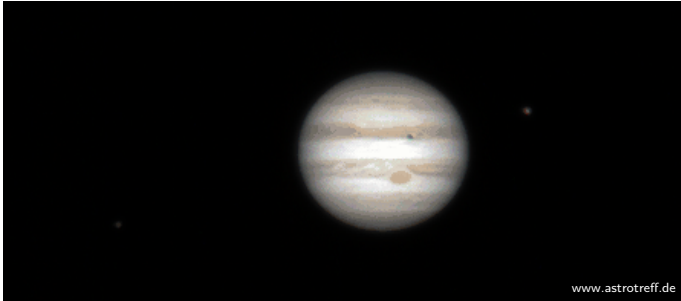
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufszeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



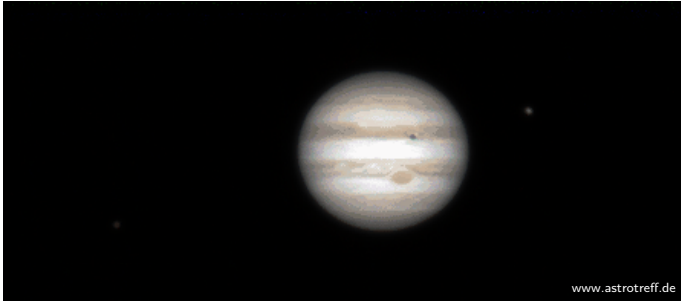
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit **auf See die Zeit bestimmen.**

Woher weiss man das?



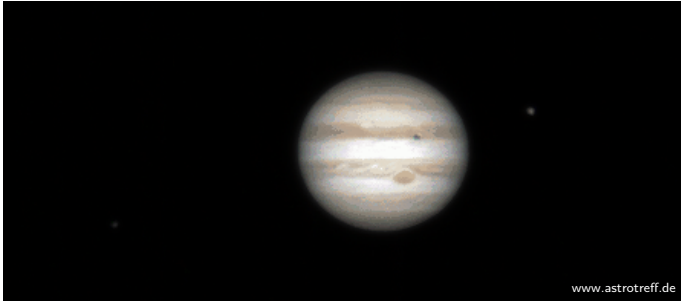
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit **auf See die Zeit bestimmen.**

Woher weiss man das?



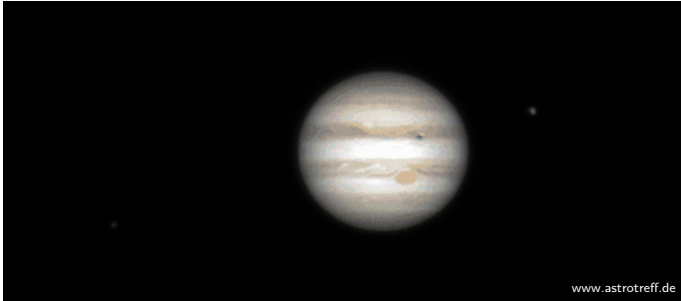
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



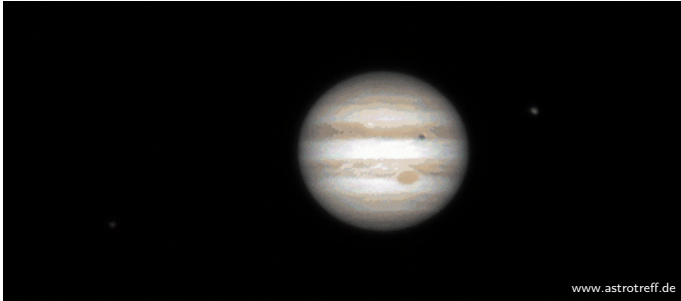
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



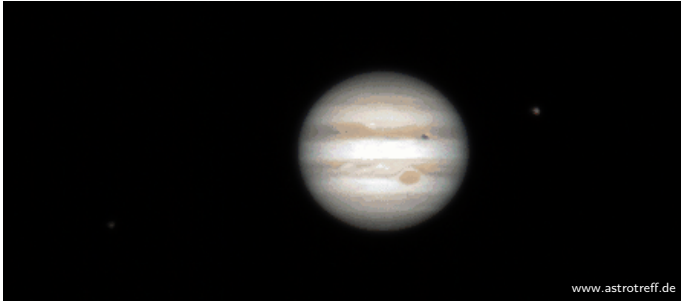
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



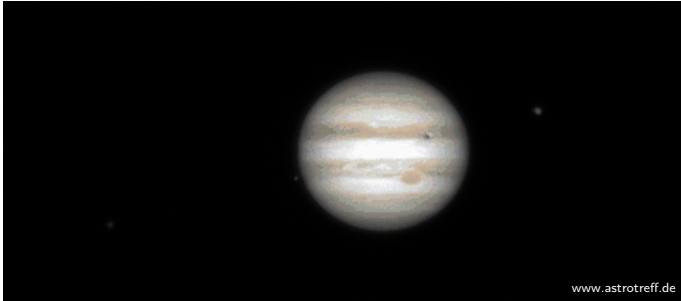
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit **auf See die Zeit bestimmen.**

Woher weiss man das?



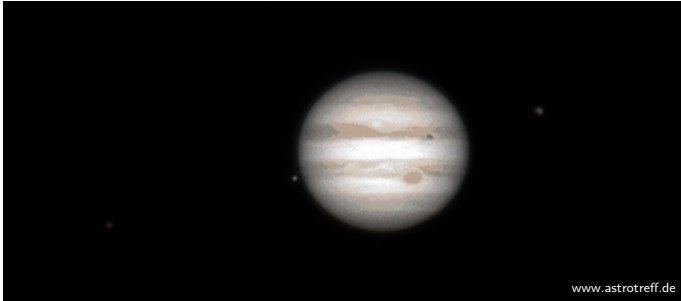
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



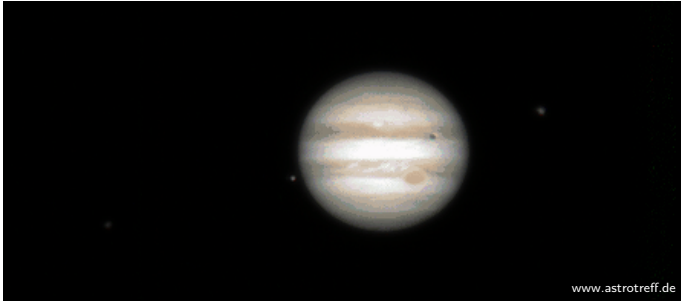
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufszeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



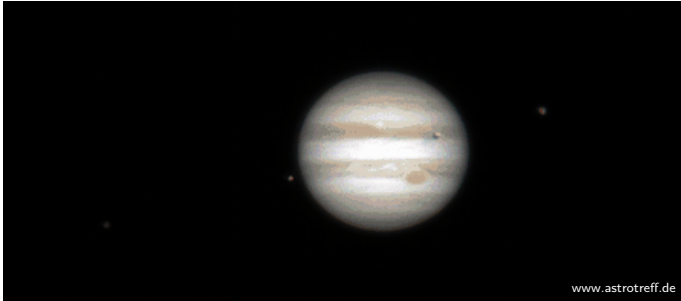
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



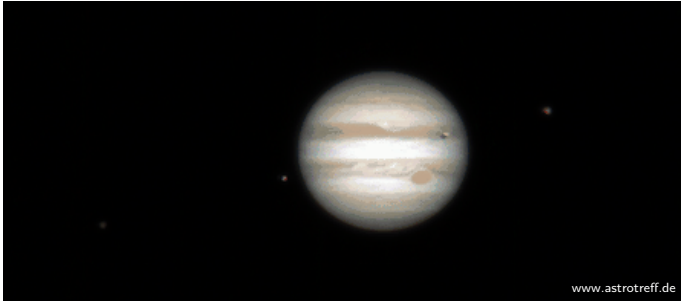
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit **auf See die Zeit bestimmen.**

Woher weiss man das?



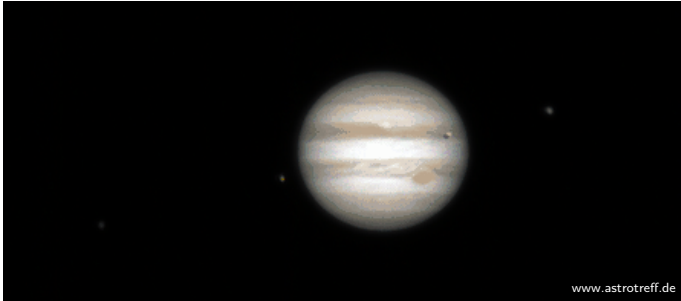
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



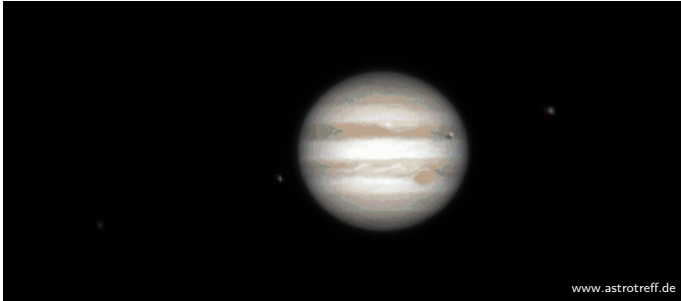
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



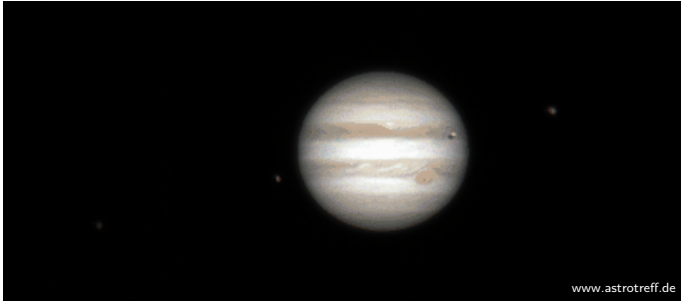
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



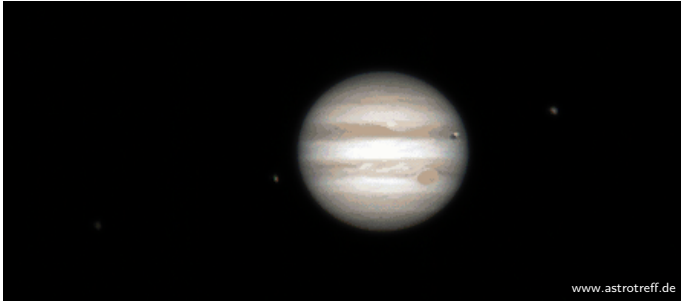
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



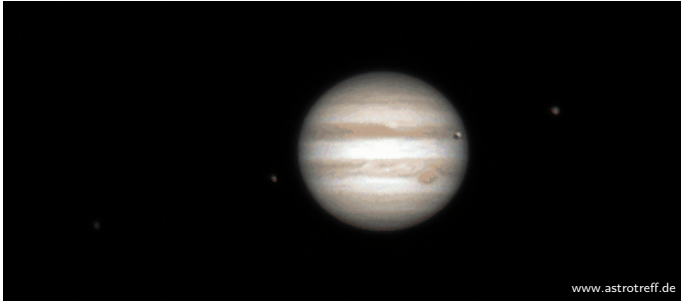
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



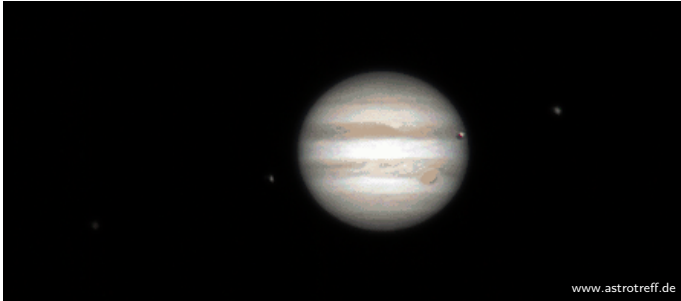
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



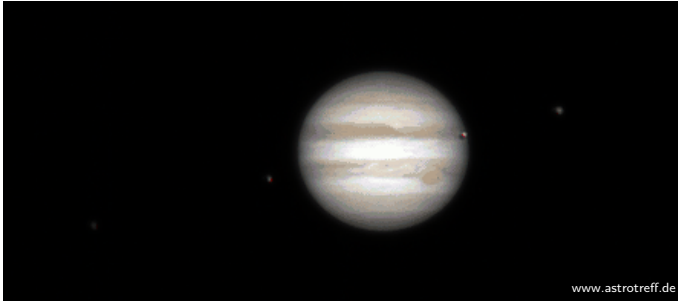
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



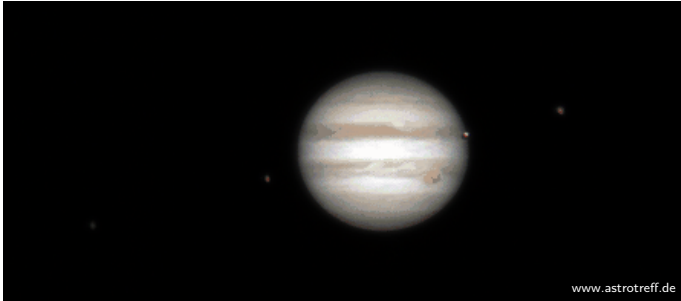
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



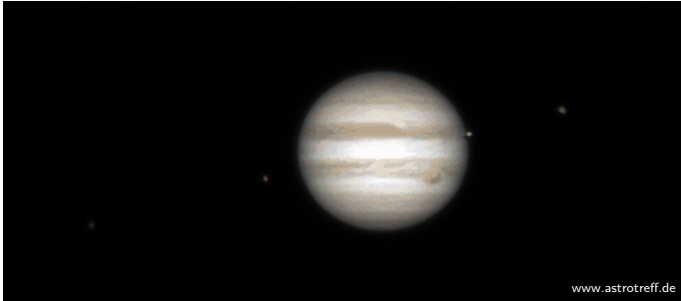
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



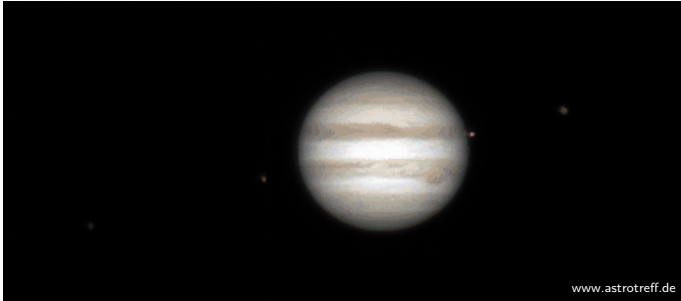
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



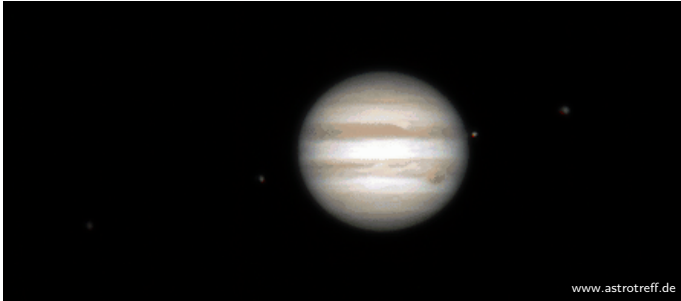
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



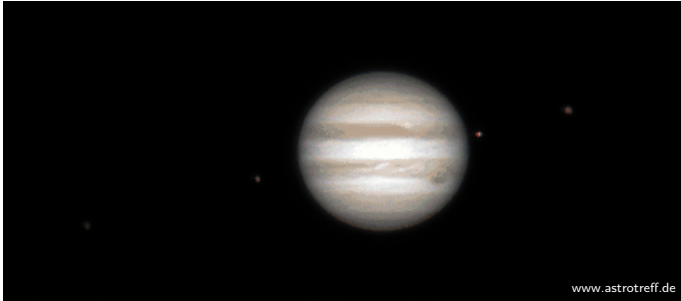
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



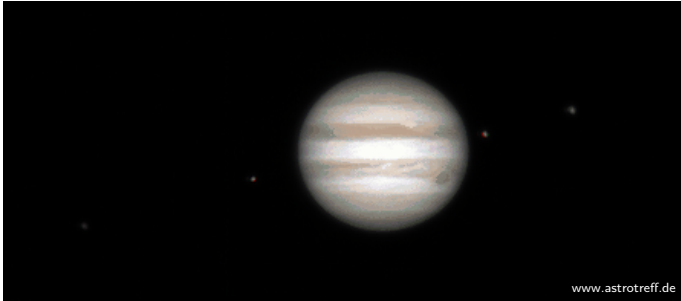
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



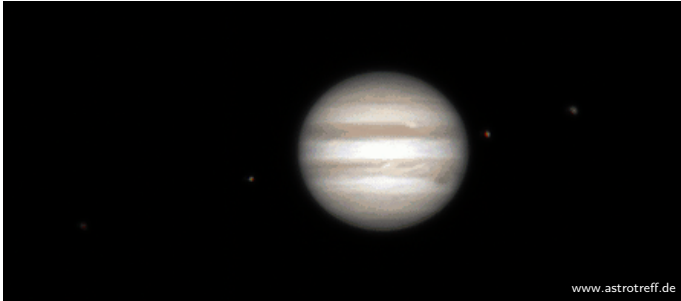
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



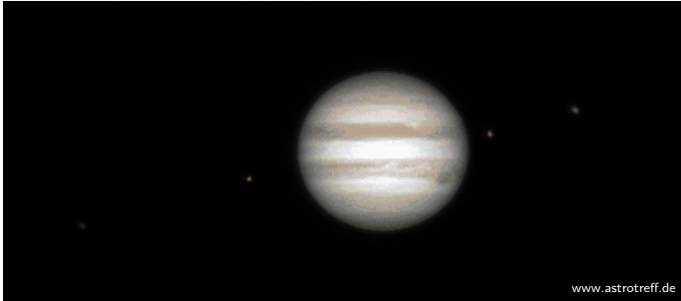
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufszeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



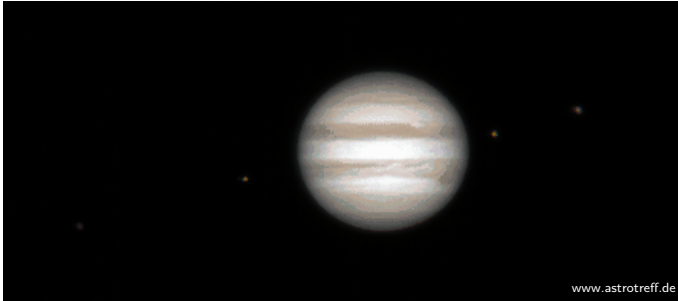
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



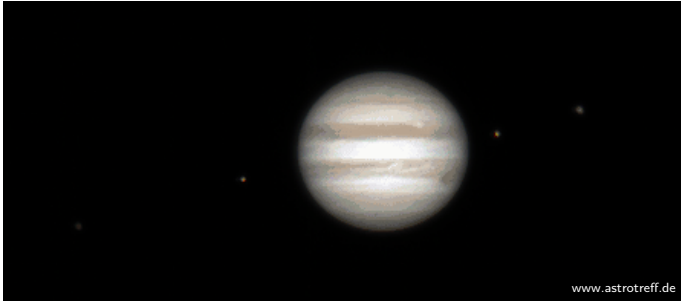
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



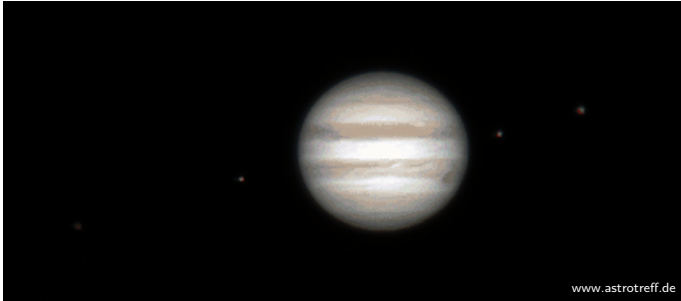
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



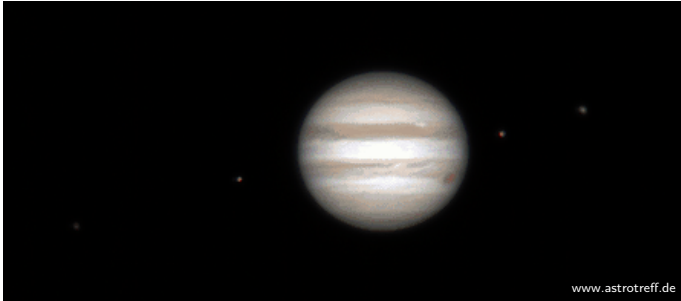
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



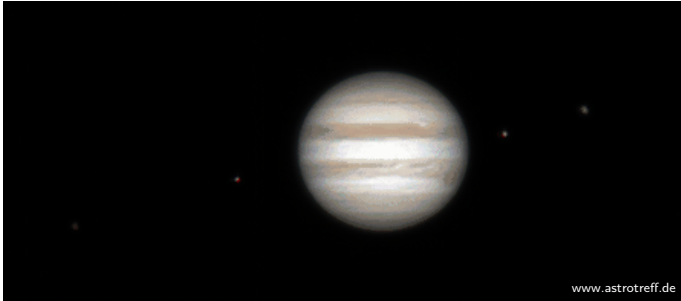
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



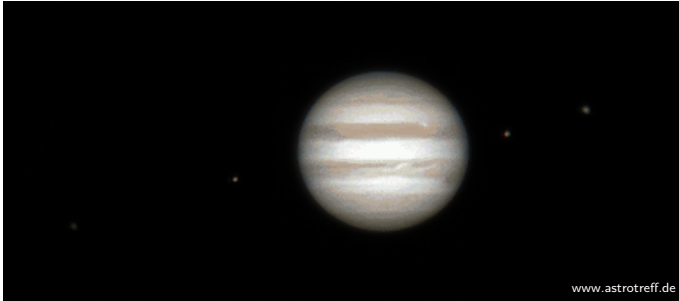
- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit auf See die Zeit bestimmen.

Woher weiss man das?



- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit **auf See die Zeit bestimmen.**

Woher weiss man das?



- Auf See beobachtete man die Ein- und Austritte der Monde aus dem Jupiterschatten.
- Umlaufzeiten der Monde sehr genau bekannt → man konnte die Schattenein- und austritte sehr genau vorhersagen und damit **auf See die Zeit bestimmen.**

Woher weiss man das?

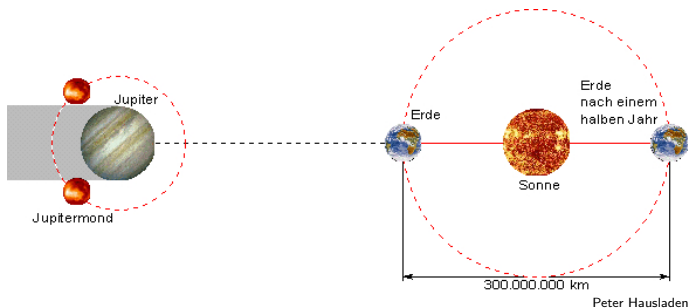
1676 stellt der dänische Astronom Ole Rømer fest, dass die beobachteten Schattenein- und austritte der Jupitermonde **systematisch von den vorausberechneten abweichen**.

→ Im Laufe eines Jahres gingen die Monde zunehmend vor, dann zunehmend nach.



Woher weiss man das?

Rømer führte die Abweichungen auf die Bewegungen der Erde um die Sonne und damit auf die unterschiedlichen Laufzeiten des Lichts zurück.



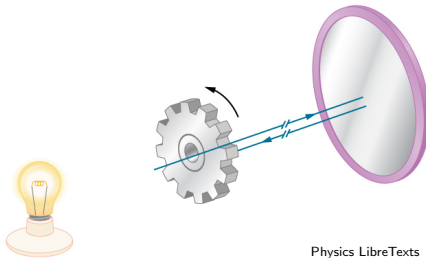
1678 bestimmte der niederländische Astronom Christiaan Huygens mittels Rømers Überlegungen die Lichtgeschwindigkeit zu 213'000 km/s.

Woher weiss man das?

- Der französische Physiker Armand Fizeau konnte 1849 mit seiner **Zahnradmethode** die Lichtgeschwindigkeit das erste Mal “im Labor” bestimmen. Er fand 315'000 km/s.

Woher weiss man das?

- Der französische Physiker Armand Fizeau konnte 1849 mit seiner **Zahnradmethode** die Lichtgeschwindigkeit das erste Mal “im Labor” bestimmen. Er fand 315'000 km/s.



Woher weiss man das?

- Der französische Physiker Armand Fizeau konnte 1849 mit seiner **Zahnradmethode** die Lichtgeschwindigkeit das erste Mal “im Labor” bestimmen. Er fand 315'000 km/s.
- Mit weiteren Methoden wurde die Lichtgeschwindigkeit immer genauer bestimmt. 1972 betrug die beste Messung $299'792'456.2 \pm 1.1$ m/s.

Woher weiss man das?

- Der französische Physiker Armand Fizeau konnte 1849 mit seiner **Zahnradmethode** die Lichtgeschwindigkeit das erste Mal "im Labor" bestimmen. Er fand 315'000 km/s.
- Mit weiteren Methoden wurde die Lichtgeschwindigkeit immer genauer bestimmt. 1972 betrug die beste Messung 299'792'456.2 \pm 1.1 m/s.
- 1983 **definierte man den Meter neu** als diejenige Strecke, die Licht im Vakuum im 299'792'458sten Teil einer Sekunde zurücklegt. Logischerweise beträgt seither die Lichtgeschwindigkeit *exakt* 299'792'458 m/s.

Mit Licht Distanzen messen

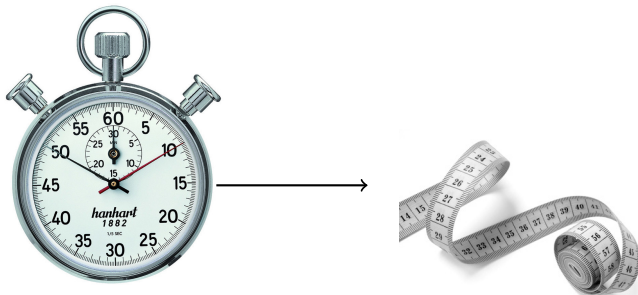
Mit Licht Distanzen messen

- Die Lichtgeschwindigkeit gibt an, welche Strecke ein Lichtblitz in einer gewissen Zeit zurücklegt.



Mit Licht Distanzen messen

- Die Lichtgeschwindigkeit gibt an, welche Strecke ein Lichtblitz in einer gewissen Zeit zurücklegt.



- Kann man die Zeit sehr genau messen, die ein Lichtblitz benötigt, um eine gewisse Strecke zurückzulegen, kann man so diese Strecke messen.

Mit Licht Distanzen messen

- Ein **Laser-Strahl** wird losgeschickt, reflektiert und wieder empfangen.



Mit Licht Distanzen messen



- Ein **Laser-Strahl** wird losgeschickt, reflektiert und wieder empfangen.
- Es wird die **Zeit t** gemessen die zwischen Aussenden und Empfangen verstreicht.

Mit Licht Distanzen messen



- Ein **Laser-Strahl** wird losgeschickt, reflektiert und wieder empfangen.
- Es wird die **Zeit t** gemessen die zwischen Aussenden und Empfangen verstreicht.
- Die **Distanz d** bis zum Objekt ist dann

$$d = \frac{c \cdot t}{2}.$$

Mit Licht Distanzen messen



- Ein **Laser-Strahl** wird losgeschickt, reflektiert und wieder empfangen.
- Es wird die **Zeit t** gemessen die zwischen Aussenden und Empfangen verstreicht.
- Die **Distanz d** bis zum Objekt ist dann
$$d = \frac{c \cdot t}{2}.$$
- Bei $d = 1$ m kommt das Licht nach 6.7 milliardstel einer Sekunde zurück

Mit Licht Distanzen messen



- Ein **Laser-Strahl** wird losgeschickt, reflektiert und wieder empfangen.
- Es wird die **Zeit t** gemessen die zwischen Aussenden und Empfangen verstreicht.
- Die **Distanz d** bis zum Objekt ist dann
$$d = \frac{c \cdot t}{2}.$$
- Bei $d = 1$ m kommt das Licht nach 6.7 milliardstel einer Sekunde zurück
- Handelsübliche Geräte messen so Strecken von z.T. über 100 m auf mm-Genauigkeit.

Satellite Laser Ranging (SLR)

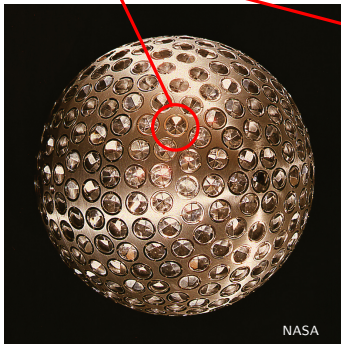
- Dank seinen Eigenschaften ist ein genügend starker Laser in der Lage sehr grosse Distanzen zu messen.

Satellite Laser Ranging (SLR)

- Dank seinen Eigenschaften ist ein genügend starker Laser in der Lage sehr grosse Distanzen zu messen.
- Man schafft es so, Distanzen zu Satelliten zu messen, die mit Retroreflektoren ausgestattet sind.

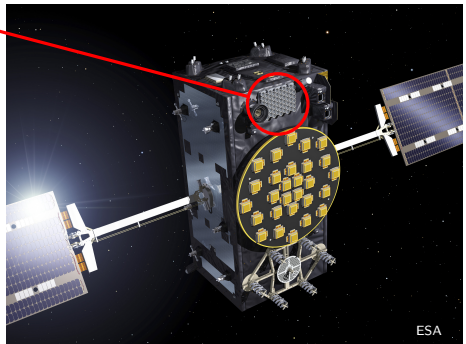
Satellite Laser Ranging (SLR)

- Dank seinen Eigenschaften ist ein genügend starker Laser in der Lage sehr grosse Distanzen zu messen.
- Man schafft es so, Distanzen zu Satelliten zu messen, die mit **Retroreflektoren** ausgestattet sind.



NASA

LAGEOS



ESA

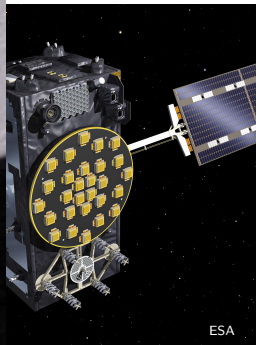
Galileo

Satellite Laser Ranging (SLR)

- Dank seinen Eigenschaften ist ein genügend starker Laser in der Lage sehr grosse Distanzen zu messen.
- Man schafft es so, Distanzen zu Satelliten zu messen, die mit **Retroreflektoren** ausgestattet sind.



LAGE



Galileo

Satellite Laser Ranging (SLR)

- Dank seinen Eigenschaften ist ein genügend starker Laser in der Lage sehr grosse Distanzen zu messen.
- Man schafft es so, Distanzen zu Satelliten zu messen, die mit Retroreflektoren ausgestattet sind.
- **Satellite Laser Ranging = "Satelliten-Laserentfernungsmessung"**

Satellite Laser Ranging (SLR)

- Dank seinen Eigenschaften ist ein genügend starker Laser in der Lage sehr grosse Distanzen zu messen.
- Man schafft es so, Distanzen zu Satelliten zu messen, die mit Retroreflektoren ausgestattet sind.
- **Satellite Laser Ranging = "Satelliten-Laserentfernungsmessung"**
- Gut zielen!

Satellit	Höhe	Lichtlaufzeit	Satellitengeschwindigkeit
LAGEOS	5'900 km	$2 \times 0.02 \text{ s}$	5.7 km/s (20'518 km/h)
Galileo	23'222 km	$2 \times 0.08 \text{ s}$	3.7 km/s (13'211 km/h)

Satellite Laser Ranging (SLR)

- Dank seinen Eigenschaften ist ein genügend starker Laser in der Lage sehr grosse Distanzen zu messen.
- Man schafft es so, Distanzen zu Satelliten zu messen, die mit Retroreflektoren ausgestattet sind.
- **Satellite Laser Ranging = "Satelliten-Laserentfernungsmessung"**
- Gut zielen!

Satellit	Höhe	Lichtlaufzeit	Satellitengeschwindigkeit
LAGEOS	5'900 km	$2 \times 0.02 \text{ s}$	5.7 km/s (20'518 km/h)
Galileo	23'222 km	$2 \times 0.08 \text{ s}$	3.7 km/s (13'211 km/h)

- Trotzdem: cm-Genauigkeit!

Satellite Laser Ranging (SLR)

- Dank seinen Eigenschaften ist ein genügend starker Laser in der Lage sehr grosse Distanzen zu messen.
- Man schafft es so, Distanzen zu Satelliten zu messen, die mit Retroreflektoren ausgestattet sind.
- **Satellite Laser Ranging = "Satelliten-Laserentfernungsmessung"**
- Gut zielen!

Satellit	Höhe	Lichtlaufzeit	Satellitengeschwindigkeit
LAGEOS	5'900 km	2×0.02 s	5.7 km/s (20'518 km/h)
Galileo	23'222 km	2×0.08 s	3.7 km/s (13'211 km/h)

- Trotzdem: cm-Genauigkeit!
- Es müssen zahlreiche Effekte berücksichtigt werden, die die Ausbreitung des Lichts beeinflussen: Atmosphäre, relativistische Effekte...

Satellite Laser Ranging (SLR)

Sternwarte Zimmerwald (7 km südlich der Stadt Bern) des
Astronomischen Instituts der Universität Bern:



Satellite Laser Ranging (SLR)

Sternwarte Zimmerwald (7 km südlich der Stadt Bern) des
Astronomischen Instituts der Universität Bern:



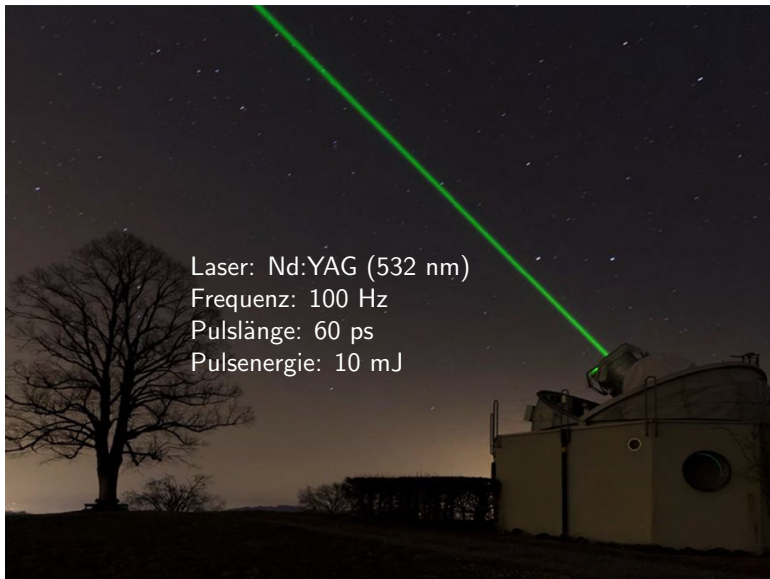
1-Meter Zimmerwald Laser- und Astrometrie-Teleskop
(ZIMLAT)

Satellite Laser Ranging (SLR)



Daniel Arnold: Zum Mond in einer Sekunde – Mit Licht Distanzen zu Satelliten messen
Astronomie am Mittag, 29. April 2019

Satellite Laser Ranging (SLR)



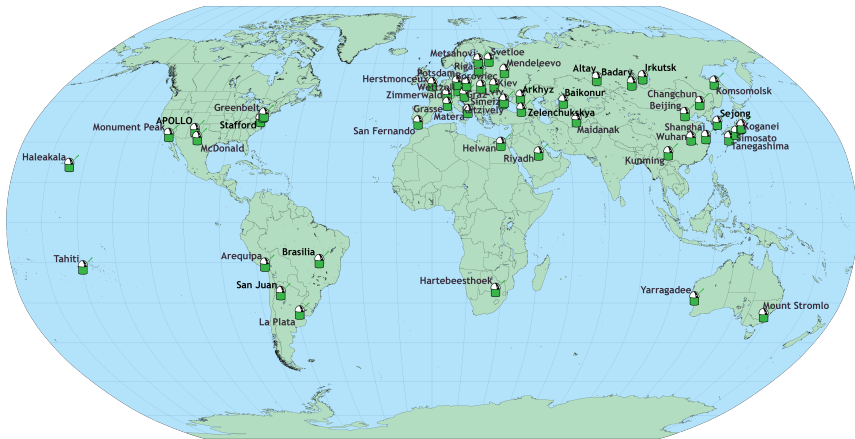
Satellite Laser Ranging (SLR)



Daniel Arnold: Zum Mond in einer Sekunde – Mit Licht Distanzen zu Satelliten messen
Astronomie am Mittag, 29. April 2019

Daniel Arnold: Zum Mond in einer Sekunde – Mit Licht Distanzen zu Satelliten messen
Astronomie am Mittag, 29. April 2019

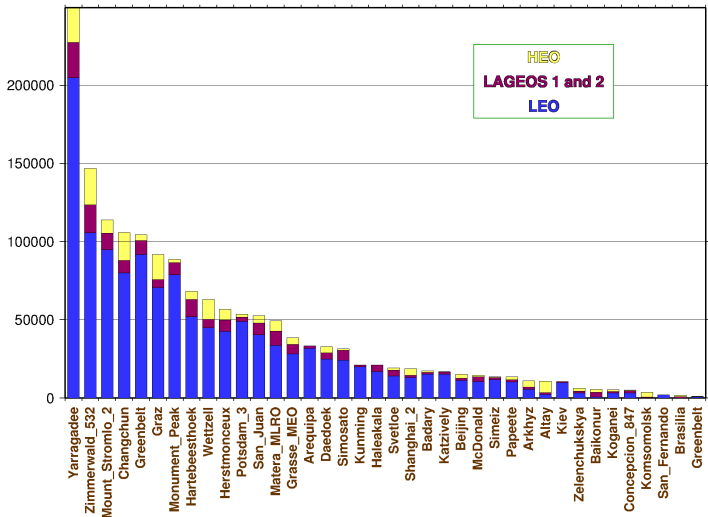
Daniel Arnold: Zum Mond in einer Sekunde
Astronomie am Mittag, 29. April 2019



Daniel Astronco

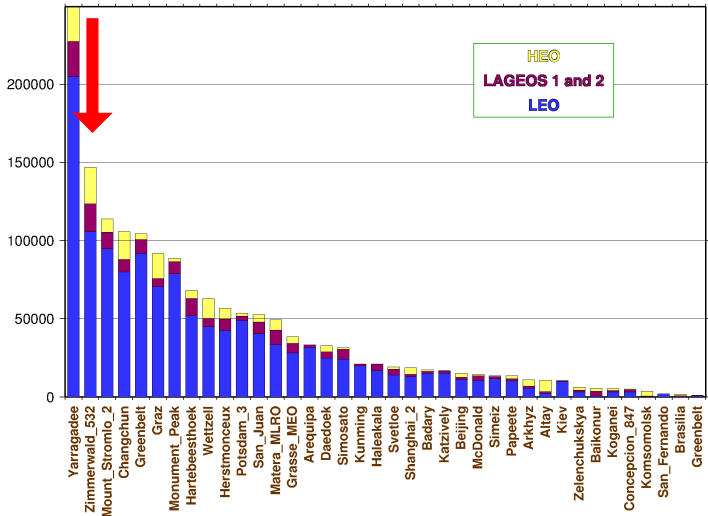
Satellite Laser Ranging (SLR)

Anzahl der SLR-Messungen von Oktober 2013 bis September 2014:



Satellite Laser Ranging (SLR)

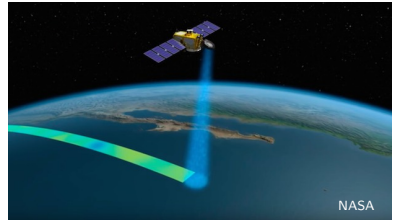
Anzahl der SLR-Messungen von Oktober 2013 bis September 2014:



SLR: Validierung



Sentinel-3

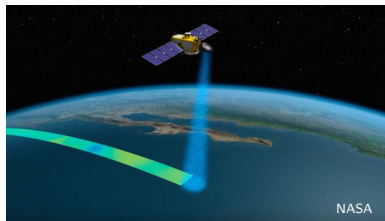


- Altimetriesatelliten messen z.B. die Meereshöhe

SLR: Validierung



Sentinel-3



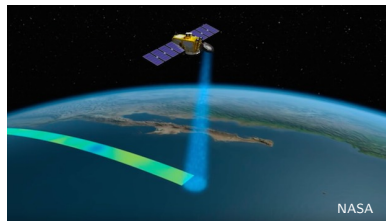
- **Altimetriesatelliten** messen z.B. die Meereshöhe
- Dazu muss man **auf cm genau** wissen, wo der Satellit ist

SLR: Validierung

GPS-Antennen



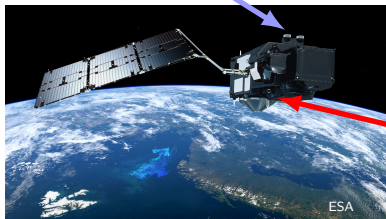
Sentinel-3



- **Altimetriesatelliten** messen z.B. die Meereshöhe
- Dazu muss man **auf cm genau** wissen, wo der Satellit ist
- Dies erreicht man mit GPS

SLR: Validierung

GPS-Antennen



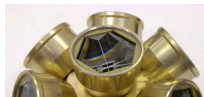
Sentinel-3



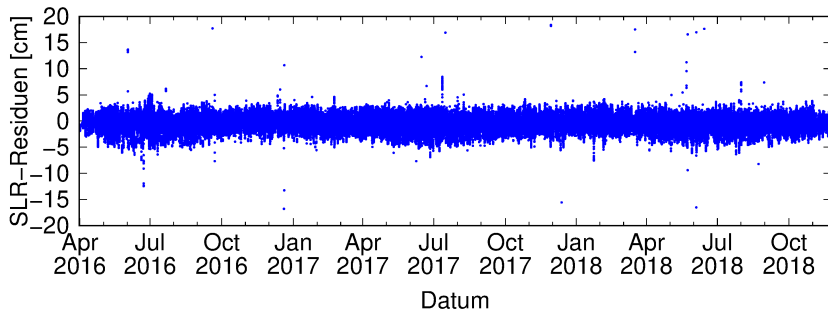
- **Altimetriesatelliten** messen z.B. die Meereshöhe
- Dazu muss man **auf cm genau** wissen, wo der Satellit ist
- Dies erreicht man mit GPS
- SLR ermöglicht eine **unabhängige Überprüfung** der berechneten Umlaufbahnen

SLR: Validierung

GPS-Antennen



Sentinel-3A

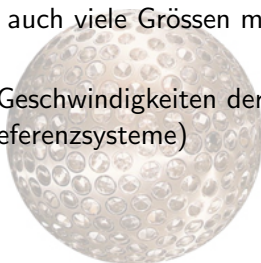


Etwa 143'000 SLR-Messungen von 17 SLR-Stationen

SLR: Geodäsie

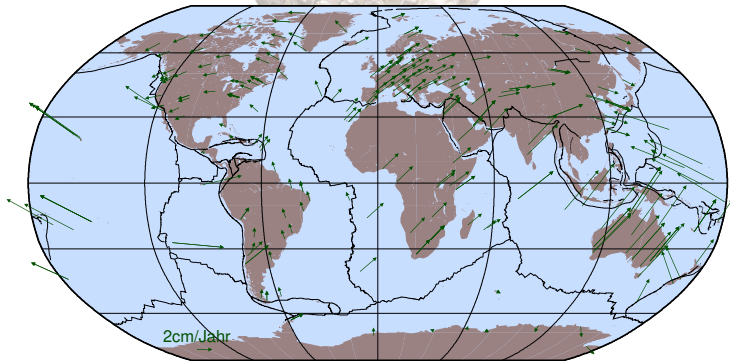
Mit SLR kann man aber auch viele Grössen messen, die die Erde als Ganzes beschreiben:

- die Positionen und Geschwindigkeiten der SLR-Stationen (Plattentektonik, Referenzsysteme)



Mit SLR kann man aber auch viele Größen messen, die die Erde als Ganzes beschreiben:

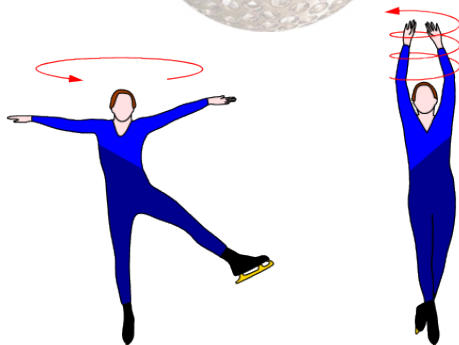
- die Positionen und Geschwindigkeiten der SLR-Stationen (Plattentektonik, Referenzsysteme)



SLR: Geodäsie

Mit SLR kann man aber auch viele Größen messen, die die Erde als Ganzes beschreiben:

- die Positionen und Geschwindigkeiten der SLR-Stationen (Plattentektonik, Referenzsysteme)
- die Erdrotation



SLR: Geodäsie

Mit SLR kann man aber auch viele Grössen messen, die die Erde als Ganzes beschreiben:

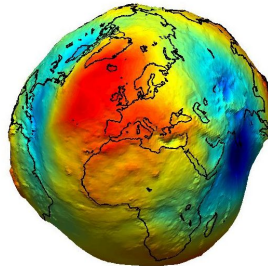
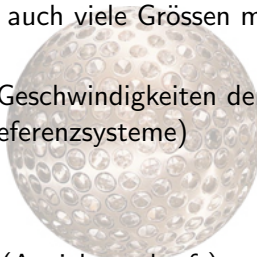
- die Positionen und Geschwindigkeiten der SLR-Stationen (Plattentektonik, Referenzsysteme)
- die Erdrotation
- ...

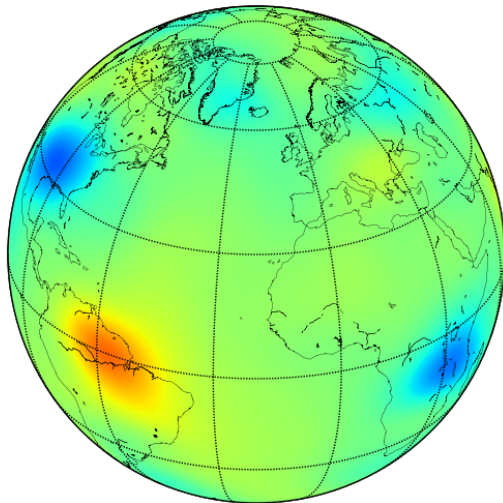


SLR: Geodäsie

Mit SLR kann man aber auch viele Grössen messen, die die Erde als Ganzes beschreiben:

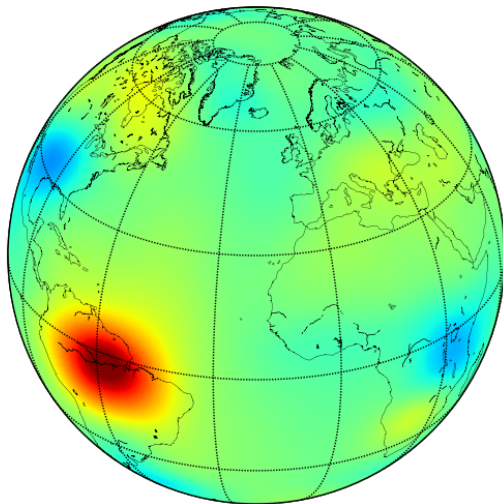
- die Positionen und Geschwindigkeiten der SLR-Stationen (Plattentektonik, Referenzsysteme)
- die Erdrotation
- ...
- das **Erdschwerefeld** (Anziehungskraft) und seine Variation





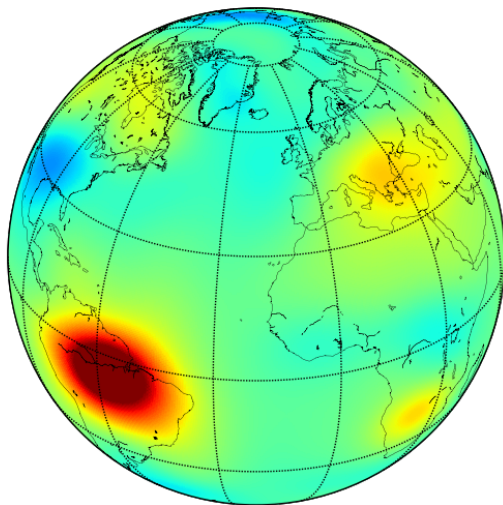
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Januar
2006



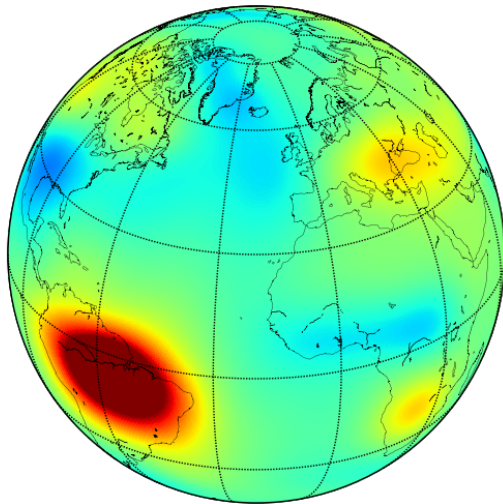
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Februar
2006



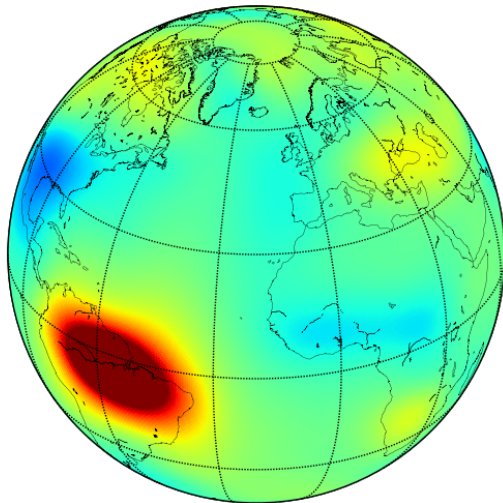
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

März
2006



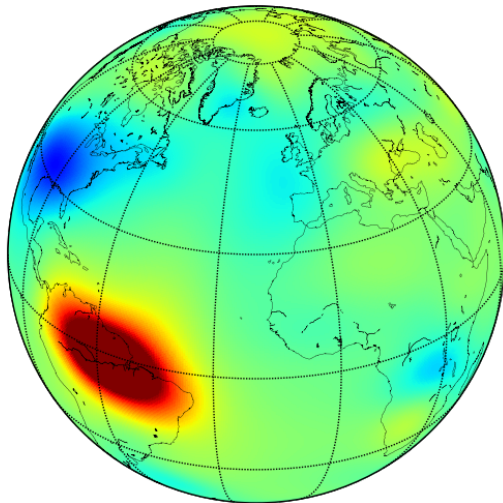
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

April
2006



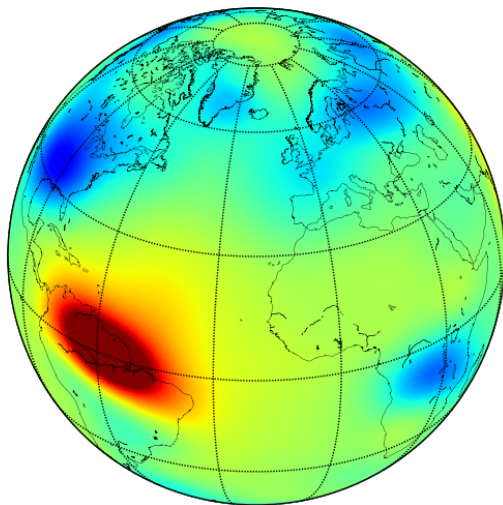
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Mai
2006



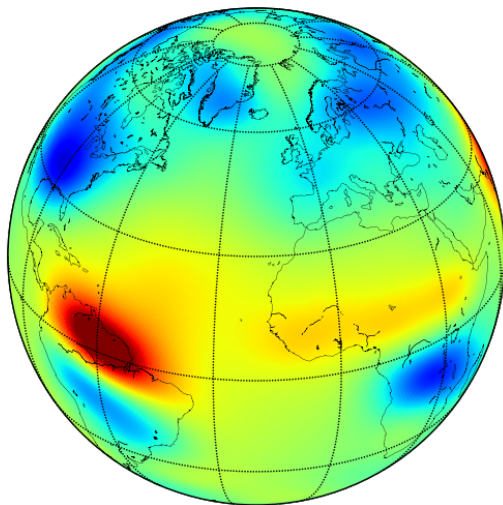
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Juni
2006



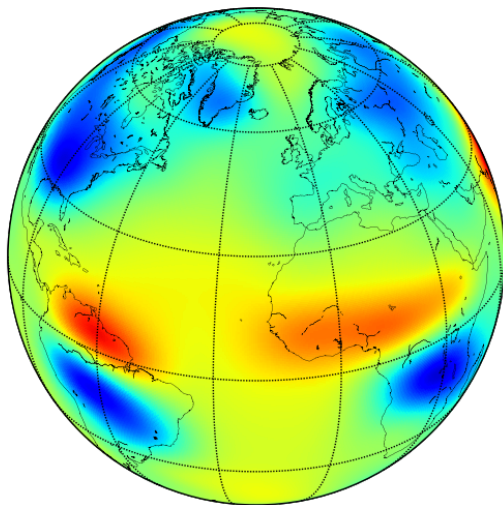
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Juli
2006



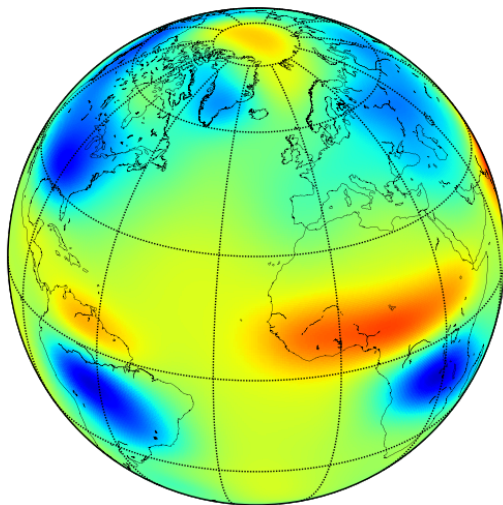
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

August
2006



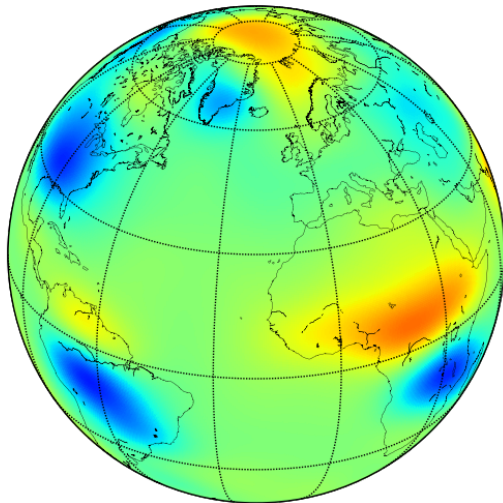
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

September
2006



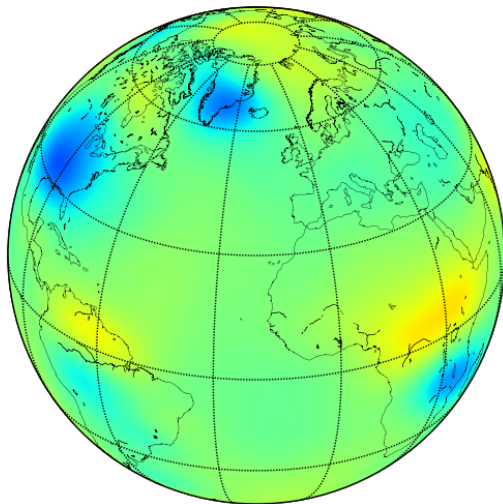
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Oktober
2006



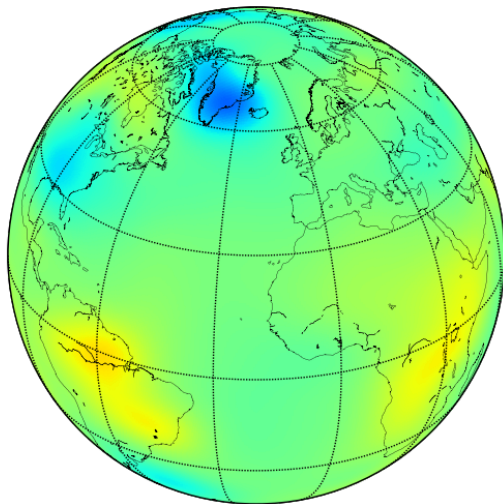
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

November
2006



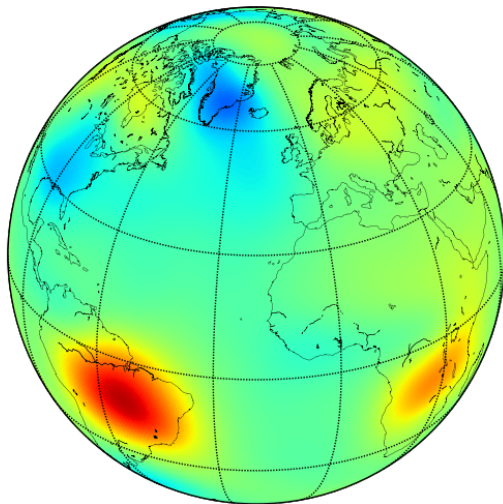
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Dezember
2006



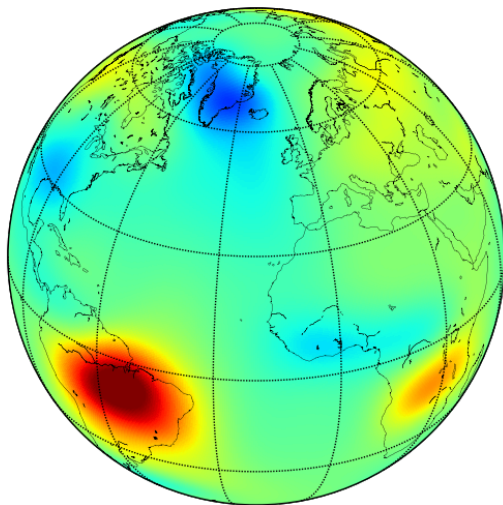
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Januar
2007



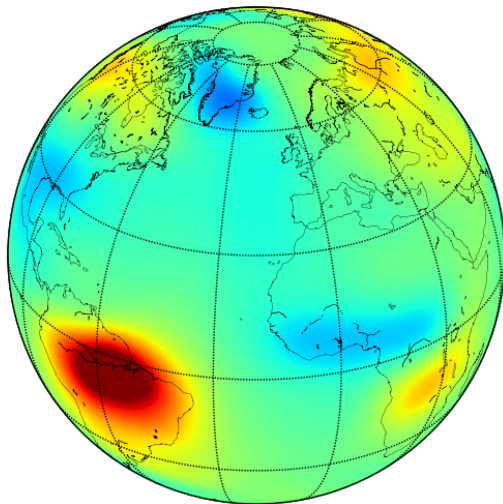
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Februar
2007



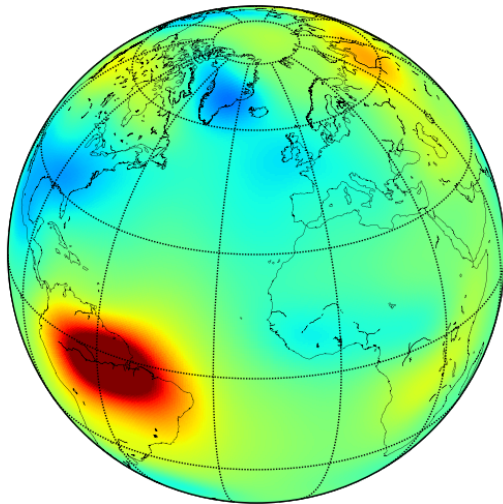
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

März
2007



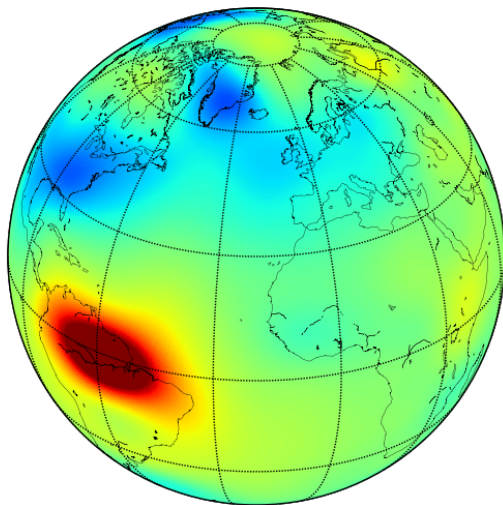
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

April
2007



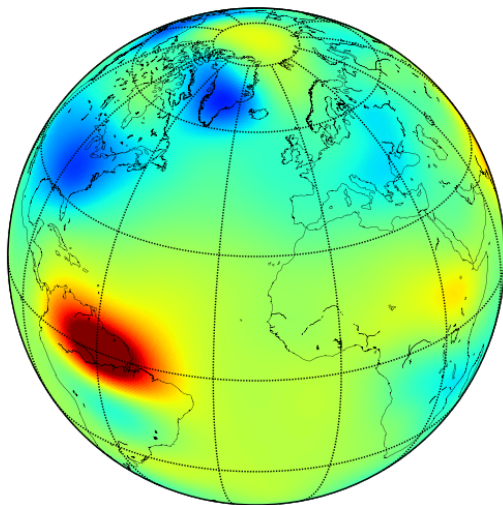
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Mai
2007



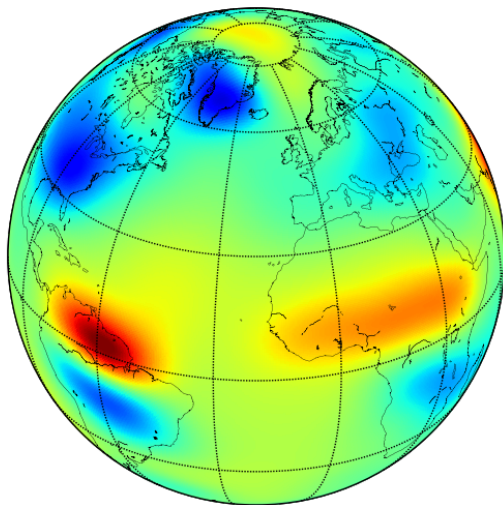
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Juni
2007



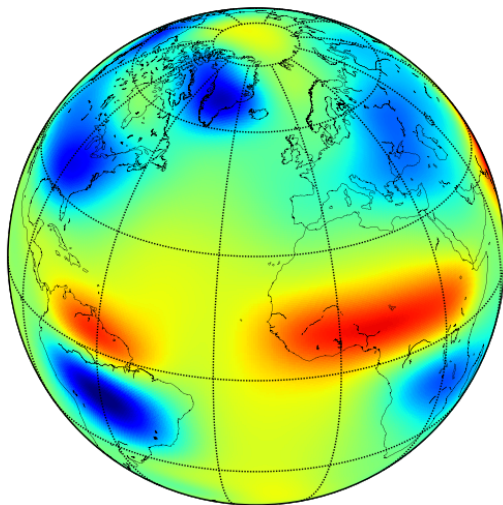
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Juli
2007



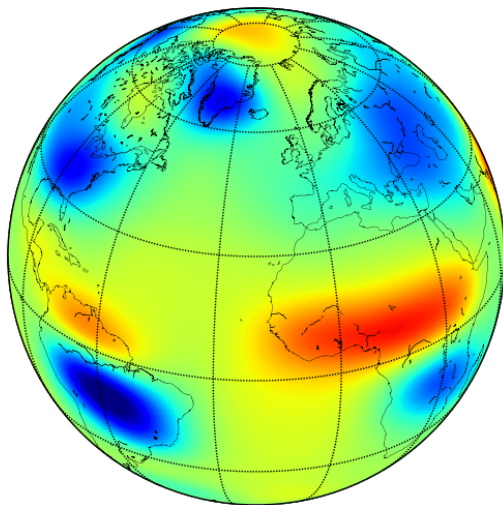
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

August
2007



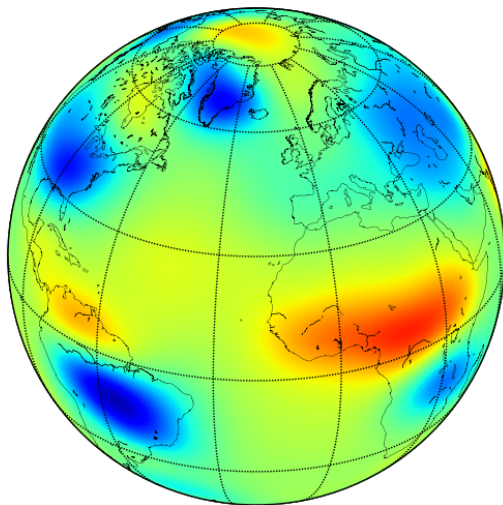
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

September
2007



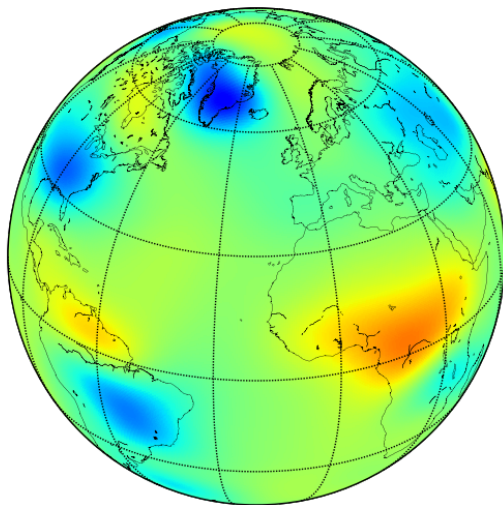
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Oktober
2007



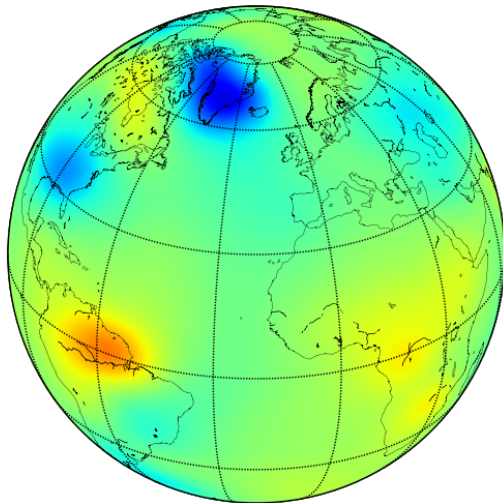
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

November
2007



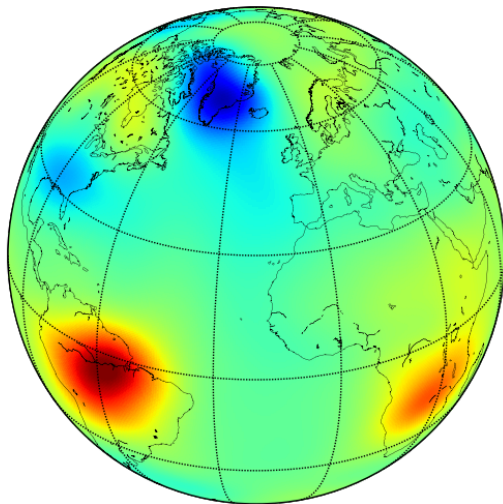
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Dezember
2007



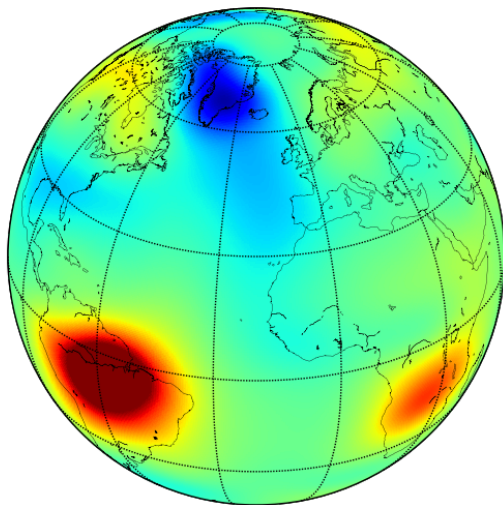
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Januar
2008



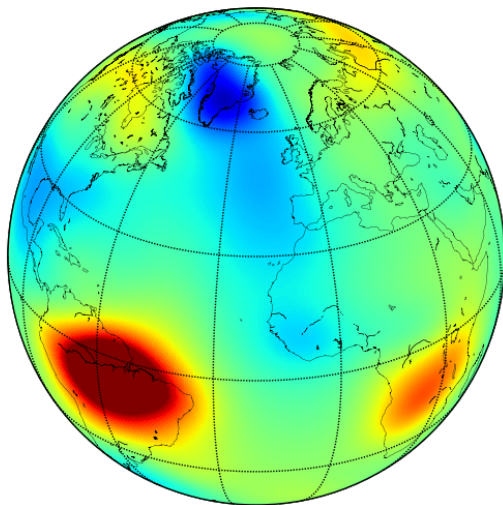
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Februar
2008



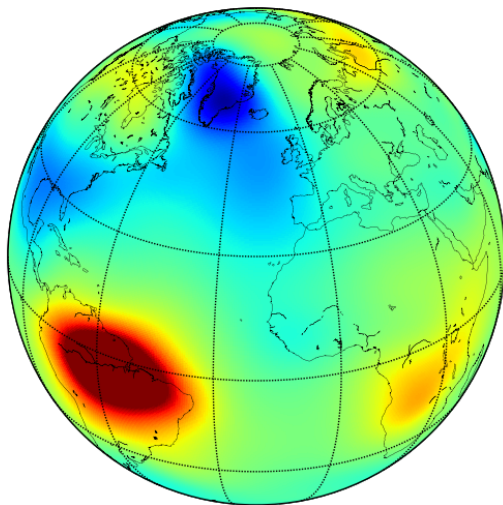
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

März
2008



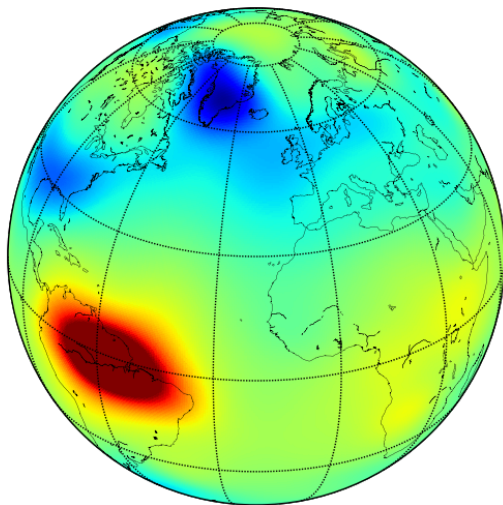
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

April
2008



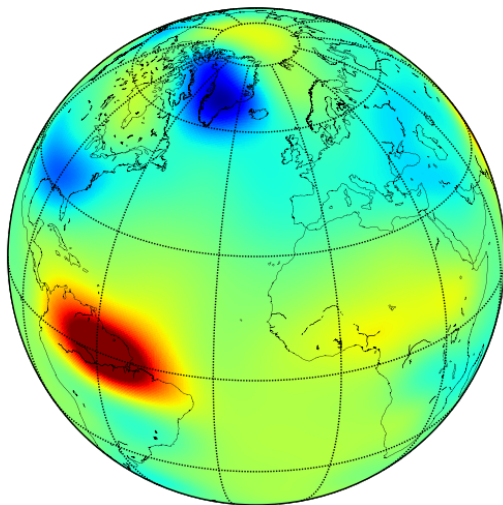
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Mai
2008



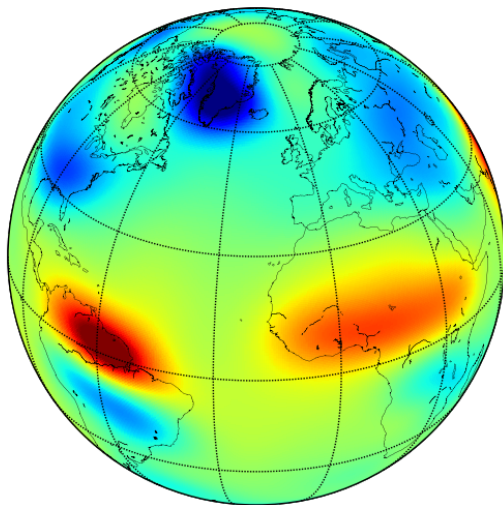
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Juni
2008



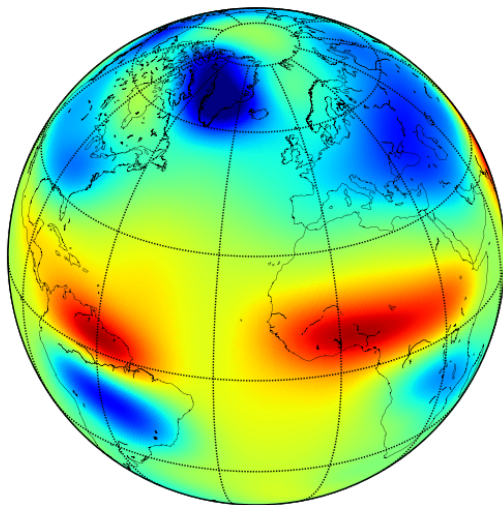
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Juli
2008



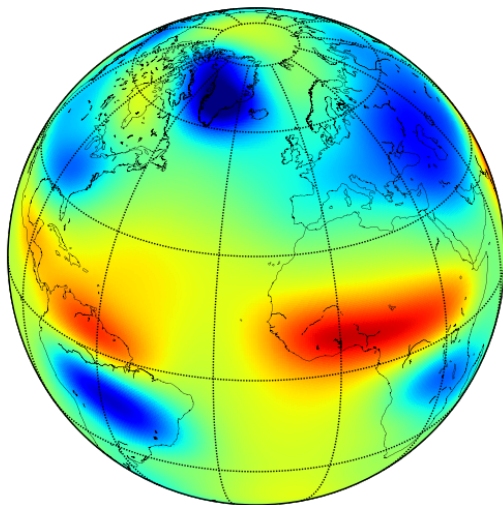
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

August
2008



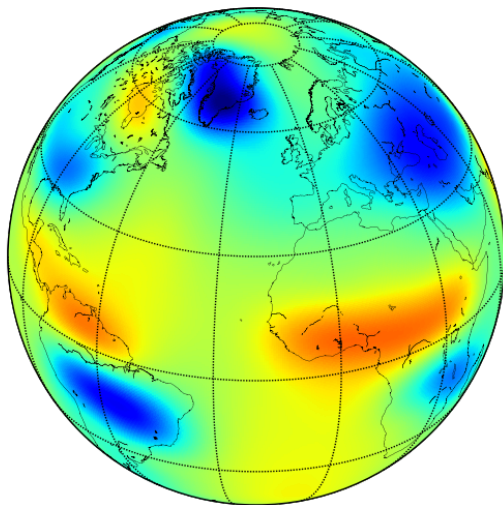
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

September
2008



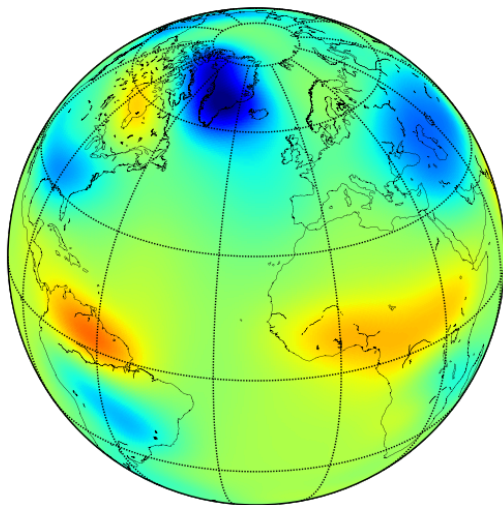
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Oktober
2008



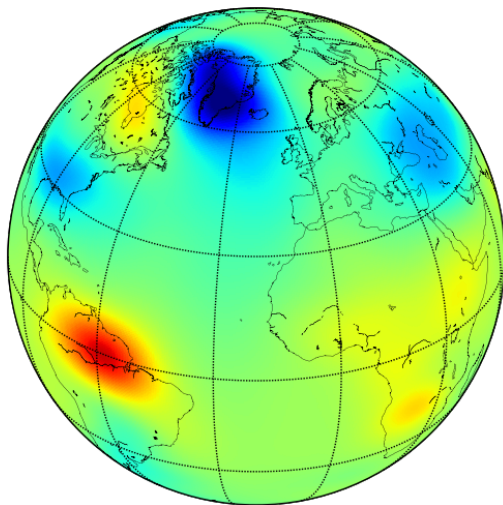
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

November
2008



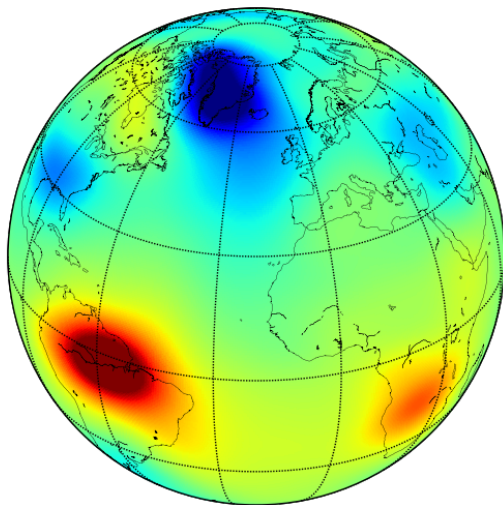
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Dezember
2008



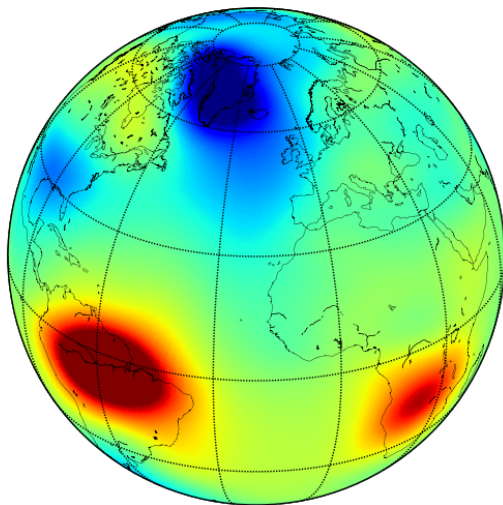
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Januar
2009



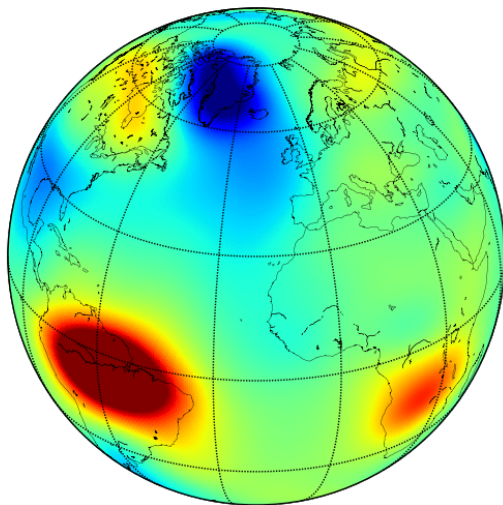
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Februar
2009



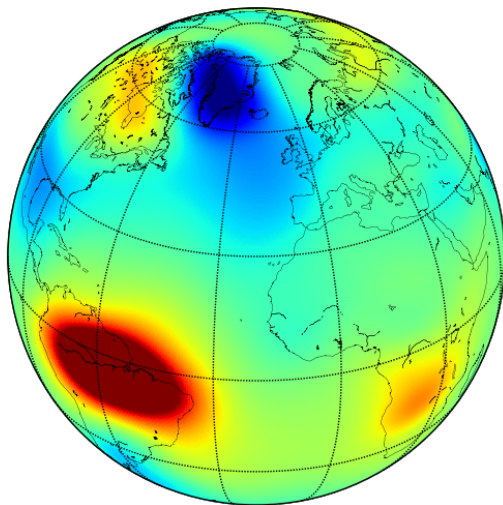
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

März
2009



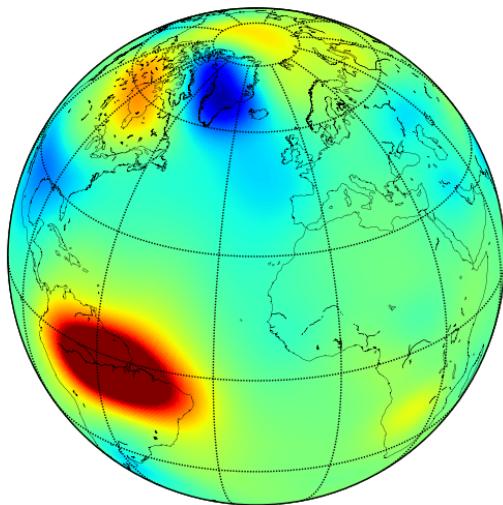
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

April
2009



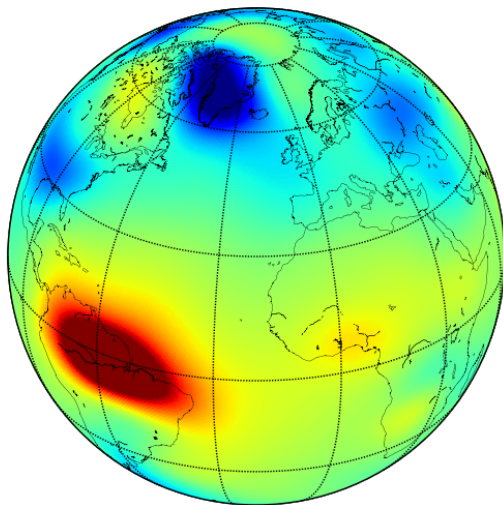
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Mai
2009



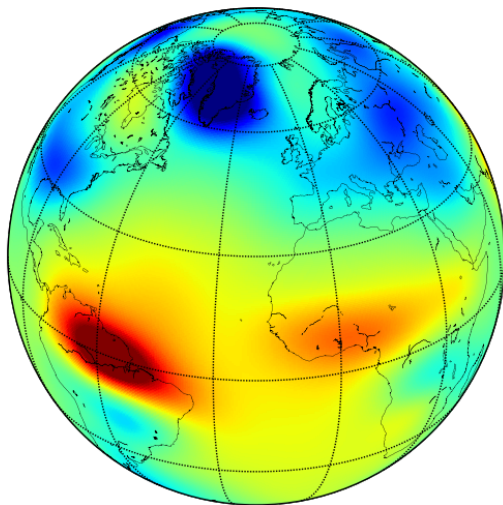
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Juni
2009



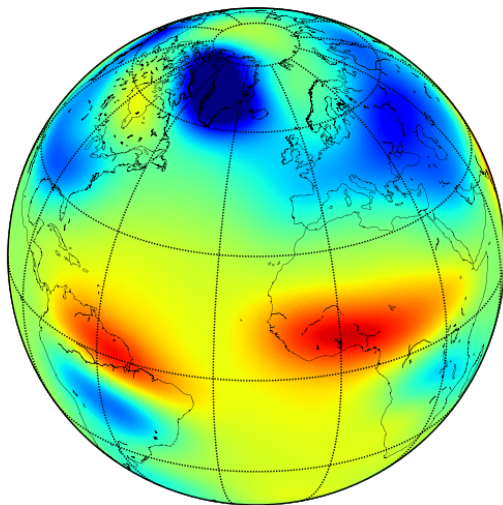
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Juli
2009



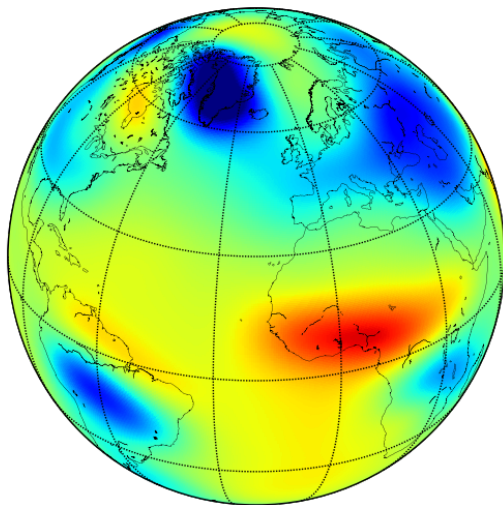
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

August
2009



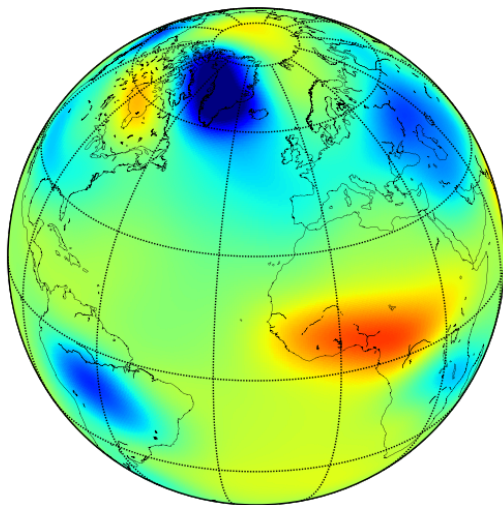
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

September
2009



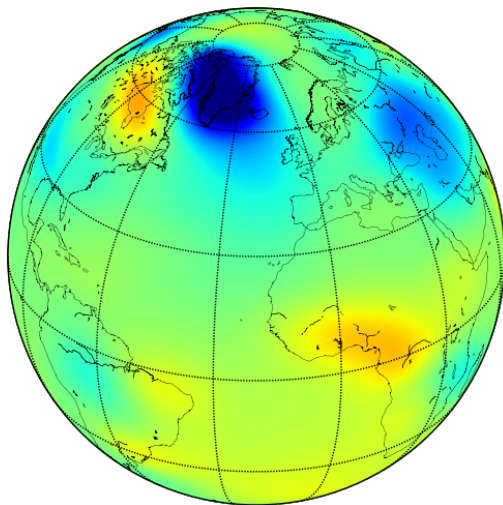
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Oktober
2009



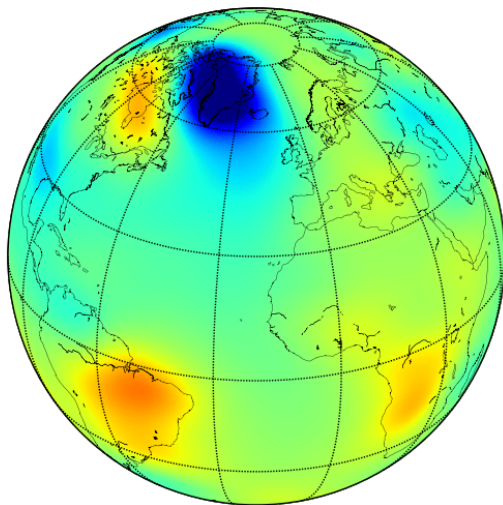
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

November
2009



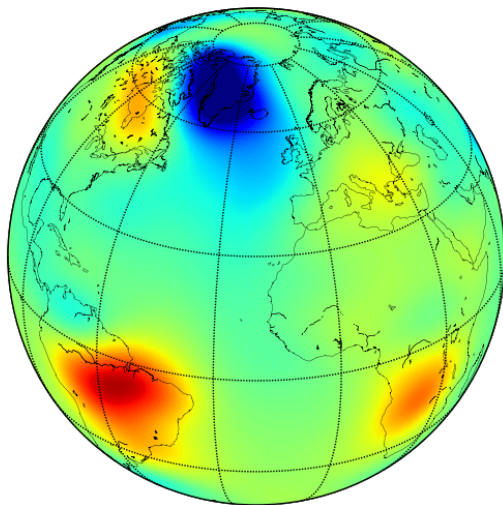
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Dezember
2009



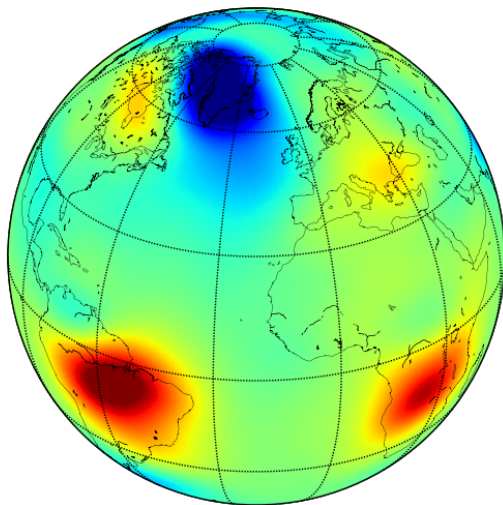
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Januar
2010



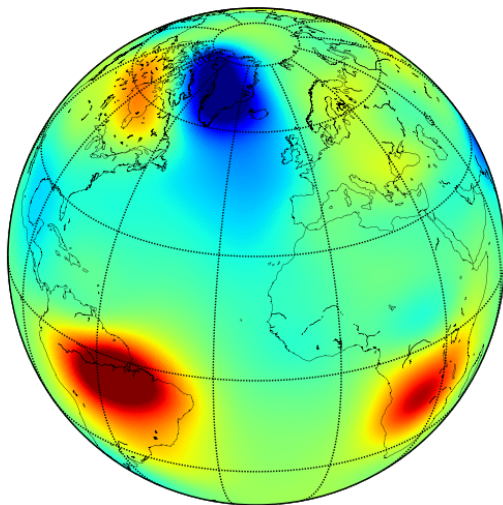
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Februar
2010



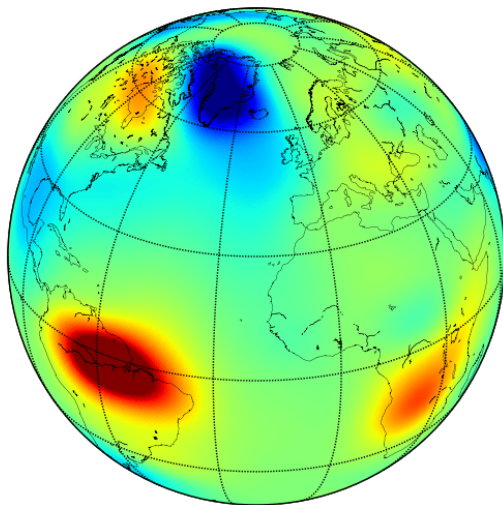
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

März
2010



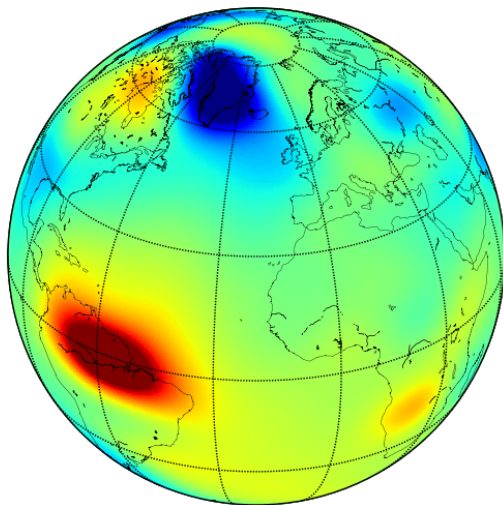
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

April
2010



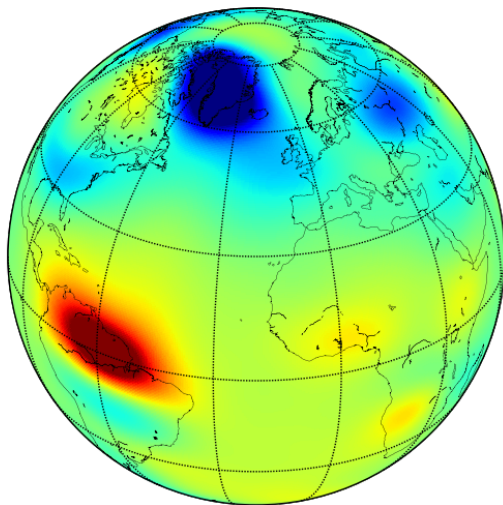
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Mai
2010



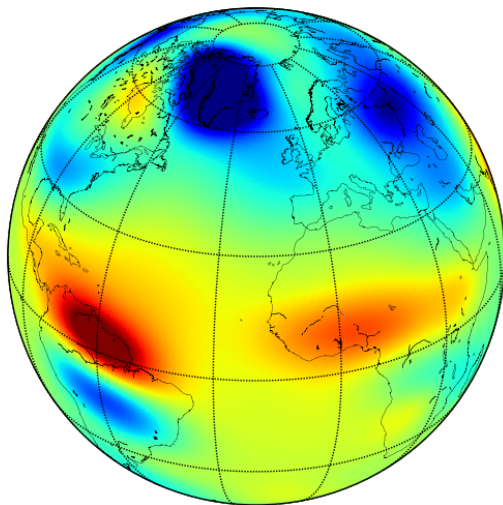
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Juni
2010



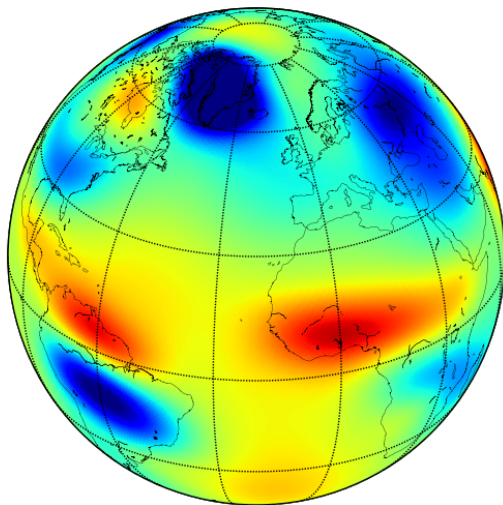
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Juli
2010



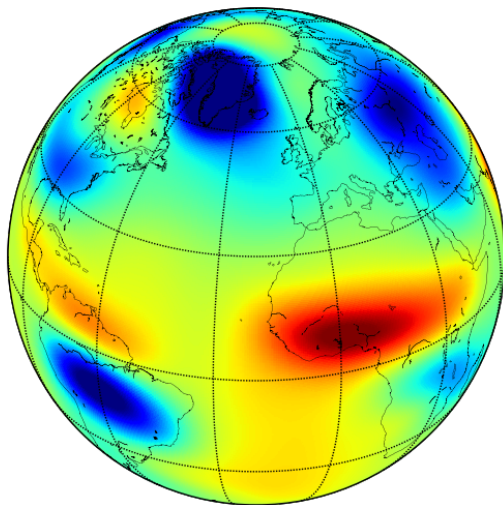
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

August
2010



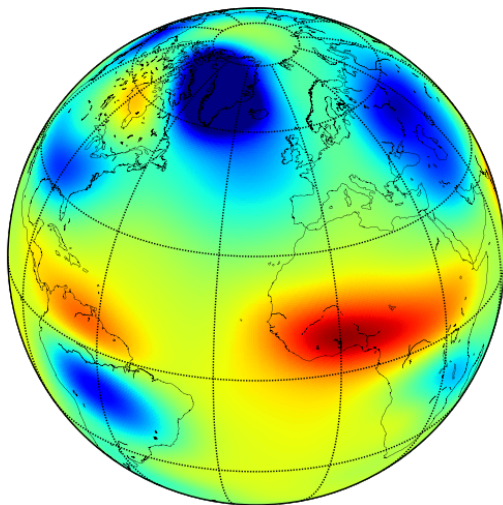
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

September
2010



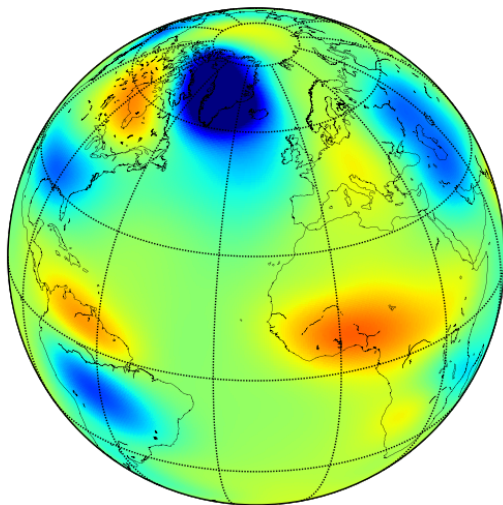
Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

Oktober
2010



Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

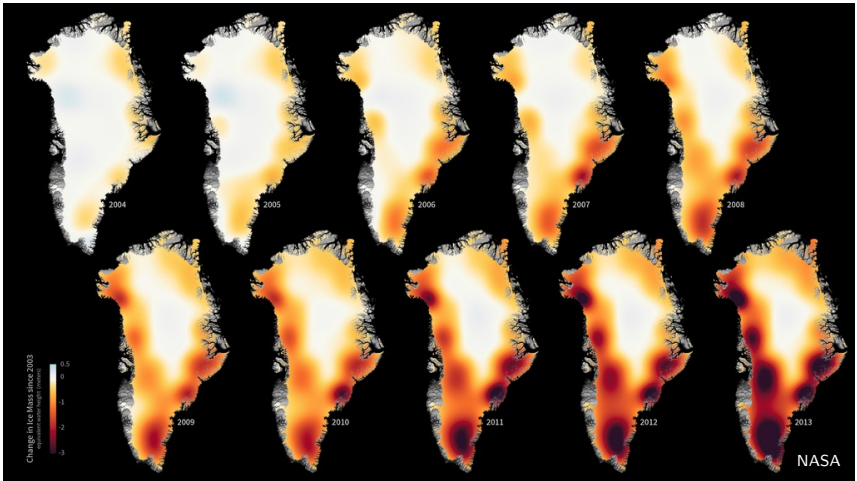
November
2010



Massenumlagerungen
ändern das Erdschwerefeld

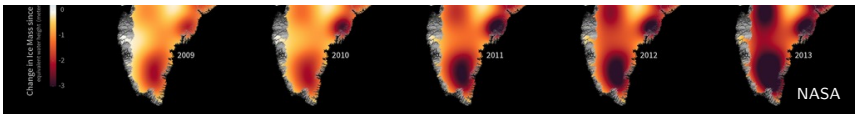
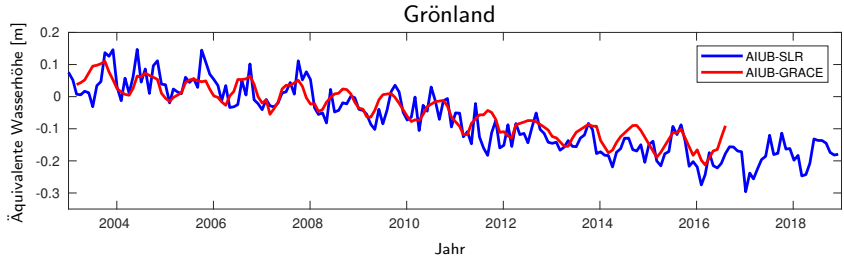
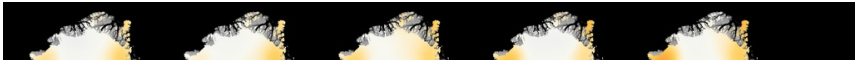
Dezember
2010

Aus der Änderung des Erdschwerefeld ermittelter **Eismassenverlust** in Grönland (GRACE-Satelliten):



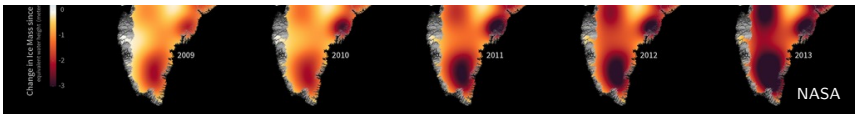
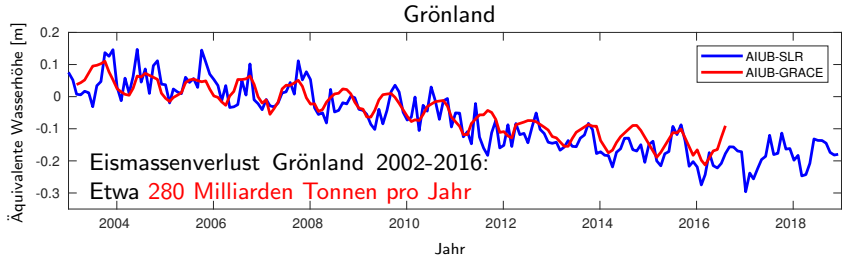
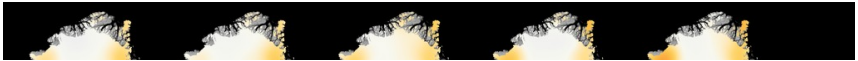
SLR: Geodäsie

Aus der Änderung des Erdschwerefeld ermittelter **Eismassenverlust** in Grönland (GRACE-Satelliten):

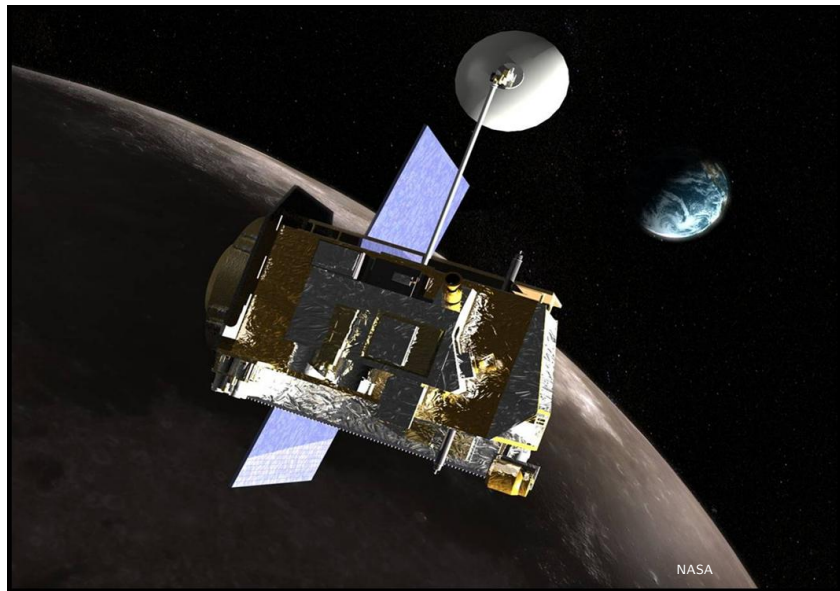


SLR: Geodäsie

Aus der Änderung des Erdschwerefeld ermittelter **Eismassenverlust** in Grönland (GRACE-Satelliten):



SLR: Bis zum Mond



Daniel Arnold: Zum Mond in einer Sekunde – Mit Licht Distanzen zu Satelliten messen
Astronomie am Mittag, 29. April 2019

SLR: Bis zum Mond

- Der Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) umkreist den Mond seit 2009 zu dessen Erkundung

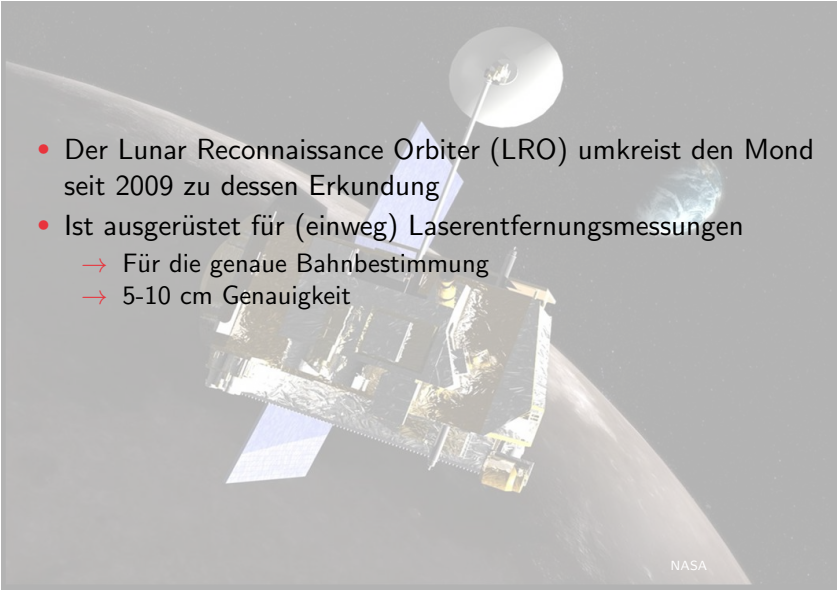
NASA

SLR: Bis zum Mond

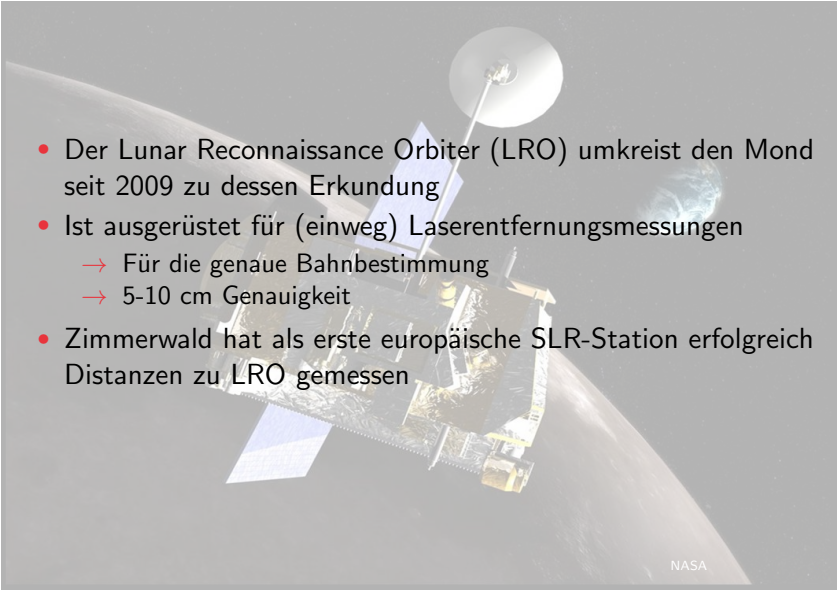
- Der Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) umkreist den Mond seit 2009 zu dessen Erkundung
- Ist ausgerüstet für (einweg) Laserentfernungsmessungen

NASA

SLR: Bis zum Mond

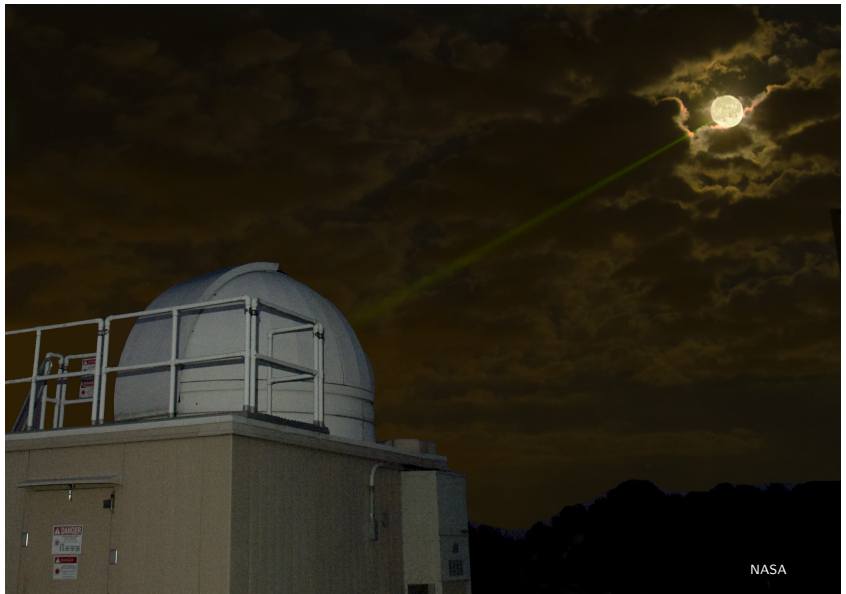
- 
- A detailed illustration of the Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) in its orbit around the Moon. The satellite is shown from a perspective that highlights its complex structure, including a large white parabolic dish antenna at the top, solar panel arrays, and various scientific instruments. The Moon's surface is visible in the background, showing craters and lunar terrain. The Earth's horizon is also visible in the distance. The NASA logo is present in the bottom right corner of the image.
- Der Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) umkreist den Mond seit 2009 zu dessen Erkundung
 - Ist ausgerüstet für (einweg) Laserentfernungsmessungen
 - Für die genaue Bahnbestimmung
 - 5-10 cm Genauigkeit

SLR: Bis zum Mond

- 
- Der Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) umkreist den Mond seit 2009 zu dessen Erkundung
 - Ist ausgerüstet für (einweg) Laserentfernungsmessungen
 - Für die genaue Bahnbestimmung
 - 5-10 cm Genauigkeit
 - Zimmerwald hat als erste europäische SLR-Station erfolgreich Distanzen zu LRO gemessen

NASA

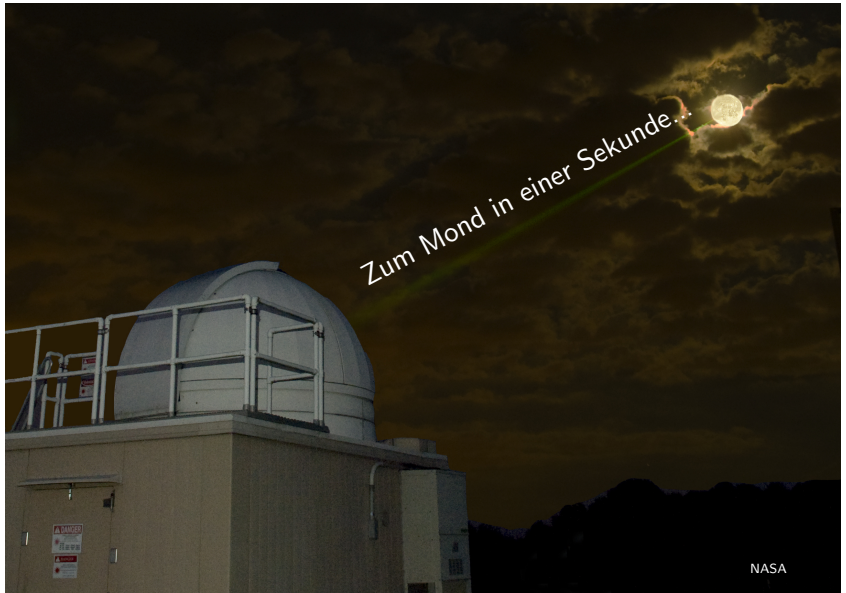
Satellite Laser Ranging (SLR)



Daniel Arnold: Zum Mond in einer Sekunde – Mit Licht Distanzen zu Satelliten messen
Astronomie am Mittag, 29. April 2019

Satellite Laser Ranging (SLR)

Daniel Arnold: Zum Mond in einer Sekunde – Mit Licht Distanzen zu Satelliten messen
Astronomie am Mittag, 29. April 2019



Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

www.aiub.unibe.ch

